

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Synchronous Generator Baixo Sabor - Test and Commissioning**

**Hugo Filipe Leite Vieira de Menezes**

VERSÃO FINAL

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof.Doutor Fernando Maciel Barbosa

Co-orientador: Doutor Helmut Kersch

22 de Julho de 2014



A Dissertação intitulada


**“Synchronous Generator Baixo Sabor- Test and Commissioning”**

foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2014

o júri

  
Presidente **Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
**Professor Doutor Carlos Borralho Machado Ferreira**  
Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto  
Superior de Engenharia de Coimbra

  
**Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa**  
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



**Autor - Hugo Filipe Leite Vieira de Menezes**

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

Nesta Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, apresenta-se, de uma forma sistemática o plano dos ensaio de recepção de um alternador síncrono a instalar no Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor. Apresenta-se um estudo das normas adequadas para a recepção dos alternadores e a definição dos procedimentos para a recepção do equipamento pelo cliente. Após a sua instalação no local, realizam-se os ensaios adequados, analisam-se os resultados obtidos nos ensaios e verifica-se a sua coerência com as especificações do projeto. Executa-se uma avaliação de eventuais medidas corretivas face aos resultados obtidos nos ensaios.

Palavras Chave: alternadores síncronos, ensaios de recepção, normas de ensaio de alternadores síncronos, recepção de alternadores síncronos



# Abstract

The present thesis has been developed under a subject with most interest for the student and is also a good basis for further development on procedures tending to mitigate the technical risks whilst maintaining the quality of the final product. It verses the test and commissioning of low speed hydro generators, in this specific case a motor-generator because the unit itself can work in turbine mode or pump mode. The purpose is to demonstrate the systematical procedure taken and present the regulations observed under which the results and procedures are commented.

The results are also confirming the design and if not, corrective measures are undertaken.

Key words: commissioning synchronous generators, hydro power plant, norms for field tests and commissioning synchronous generators, synchronous generators





# Agradecimentos

Os meus agradecimentos vão para a minha família que tanto apoio me deu e compreensão teve. Aos meus orientadores que activamente participaram na condução deste trabalho e na disponibilização de informação relevante.

Hugo Menezes



*”A educação é o grande motor do desenvolvimento pessoal. É através dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que um filho de trabalhadores rurais pode chegar a presidente de uma grande nação.”*

Nelson Mandela



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Instalação dos Alternadores - Motores . . . . .	1
1.2	Seleção e Características de Projecto da Máquina a Ensaiar . . . . .	1
1.2.1	Potência, factor de potência e tipo de serviço . . . . .	2
1.2.2	Tensão e frequência estipuladas . . . . .	2
1.2.3	Velocidade e momento de inércia . . . . .	2
1.2.4	Isolamento, temperaturas e aquecimentos . . . . .	2
1.2.5	Forma de onda da tensão e reactância . . . . .	3
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>O aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor</b>	<b>5</b>
2.1	Escalão de Montante . . . . .	5
2.2	Escalão de Jusante . . . . .	6
2.3	Concepção e descrição geral do escalão de Montante . . . . .	7
2.3.1	Órgãos de descarga da barragem . . . . .	7
2.3.2	Posto de observação e comando (POC) . . . . .	10
2.3.3	Órgãos de exploração . . . . .	10
2.3.4	Circuitos hidráulicos . . . . .	11
2.3.5	Central, edifício de descarga, montagem e comando e subestação . . . . .	14
2.4	Concepção e descrição geral do escalão de Jusante . . . . .	21
2.4.1	Órgãos de descarga da barragem . . . . .	21
2.4.2	Posto de observação e comando (POC) . . . . .	23
2.4.3	Órgãos de exploração . . . . .	23
2.4.4	Circuitos Hidráulicos . . . . .	24
2.4.5	Central e edifícios de apoio e da subestação . . . . .	27
2.5	Conclusões . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Normas IEEE, IEC e outras aplicáveis ao ensaio de Alternadores</b>	<b>35</b>
3.1	Normas IEEE 115, 3.1 e IEEE 43 . . . . .	36
3.1.1	Definições . . . . .	36
3.1.2	Considerações sobre segurança . . . . .	37
3.1.3	Resistência de isolamento – teoria geral . . . . .	38
3.1.4	Factores que afectam a resistência de isolamento . . . . .	43
3.1.5	Efeito do nível de tensão utilizado no ensaio . . . . .	47
3.1.6	Efeito de carga existente no enrolamento durante a medida de isolamento	48
3.1.7	Condições de medida da resistência de isolamento . . . . .	48
3.1.8	Ligações da bobinagem para a realização da medida da resistência de iso-	48
	lamento . . . . .	

3.1.9	Métodos para medida da resistência de isolamento . . . . .	49
3.1.10	Valores mínimos recomendados para a resistência de isolamento e índice de polarização . . . . .	52
3.1.11	Ensaio utilizando tensão DC ou AC . . . . .	54
3.2	Norma IEC 60034-1, 9.2 . . . . .	56
3.3	Norma IEC 60034-4, 6.3 . . . . .	58
3.4	Conclusões . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Ensaaios de recepção do Alternador-Motor</b>	<b>61</b>
4.1	Ensaaios dieléctricos - enrolamento do estator . . . . .	61
4.2	Ensaaios dieléctricos - enrolamento do rotor . . . . .	62
4.3	Comportamento da Chumaceira Guia . . . . .	62
4.4	Ensaio de curto-circuito antes da primeira sincronização . . . . .	62
4.5	Ensaio em vazio antes da primeira sincronização . . . . .	62
4.6	Ensaio em carga depois da sincronização . . . . .	63
4.7	Determinação calorimétrica de perdas parciais para a determinação do rendimento . . . . .	63
4.8	Determinação de perdas parciais para a determinação do rendimento . . . . .	63
4.9	Determinação de quantidades da máquina . . . . .	63
4.10	Gerador depois dos ensaios de colocação em serviço . . . . .	64
4.11	Conclusões . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Ensaaios do Alternador-Motor</b>	<b>65</b>
5.1	Medida da Resistência de Isolamento do Estator . . . . .	65
5.1.1	Medida da Resistência de Isolamento das barras de fundo do estator . . . . .	65
5.1.2	Medida da Resistência de Isolamento das barras de topo do estator . . . . .	68
5.1.3	Medida da Resistência de Isolamento do enrolamento completo do estator . . . . .	73
5.2	Ensaaios de alta tensão . . . . .	77
5.2.1	Ensaio de alta tensão às barras de fundo do estator . . . . .	78
5.2.2	Ensaio de alta tensão às barras de topo do estator . . . . .	80
5.2.3	Ensaio de alta tensão ao enrolamento completo do estator . . . . .	81
5.3	Medida da Resistência entre barras de topo e núcleo . . . . .	83
5.4	Medida da Resistência das sondas de temperatura RTD/PT100 . . . . .	84
5.5	Medida da Resistência de isolamento das sondas de temperatura RTD/PT100 . . . . .	86
5.6	Ensaaios do Rotor . . . . .	88
5.6.1	Verificação do correcto binário de aperto dos polos . . . . .	88
5.6.2	Medida da resistência de isolamento . . . . .	89
5.6.3	Ensaio de alta tensão . . . . .	91
5.6.4	Cálculo da impedância de cada polo . . . . .	93
5.6.5	Medida da resistência óhmica do enrolamento rotórico . . . . .	95
5.6.6	Verificação da polaridade dos polos do enrolamento rotórico . . . . .	97
5.7	Conclusões . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros</b>	<b>99</b>
6.1	Conclusões . . . . .	99
6.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	100
<b>A</b>		<b>101</b>
A.1	Anexo 1 . . . . .	101
A.2	Anexo 2 . . . . .	101







# Lista de Figuras

2.1	Desenho de implantação do escalão de Montante . . . . .	6
2.2	Desenho de implantação do escalão de Jusante . . . . .	7
2.3	Barragem do escalão de Montante, descarga de fundo e descarregadores de superfície . . . . .	9
2.4	Barragem do escalão de Montante, descarregadores de superfície vistos de montante . . . . .	10
2.5	Escalão de Montante, tomada de água . . . . .	12
2.6	Escalão de Montante, início da galeria em carga . . . . .	13
2.7	Escalão de Montante, comportas vagão da tomada de água . . . . .	13
2.8	Acesso à central do escalão de Montante . . . . .	17
2.9	Descarregadores de cheias - detalhe . . . . .	22
2.10	Descarregadores de cheias - vista de montante . . . . .	22
2.11	Descarregadores de cheias - vista de montante . . . . .	22
2.12	Descarregadores de cheias - vista de jusante . . . . .	22
2.13	Tomada de água do escalão de Jusante . . . . .	25
2.14	Edifício de apoio e subestação do escalão de Jusante . . . . .	29
2.15	Grupo 2 do escalão de Jusante - estátor instalado . . . . .	30
2.16	Grupo 2 do escalão de Jusante - cruzeta inferior montada . . . . .	30
3.1	Circuito equivalente representando a quatro correntes em jogo durante o ensaio da resistência de isolamento [1] . . . . .	39
3.2	Curvas de correntes para um isolamento asfalto-mica [1] . . . . .	40
3.3	Curvas de corrente para um isolamento epoxi-mica com baixa corrente superficial de fugas e corrente de condução próxima de zero [2] . . . . .	41
3.4	Curvas características das medidas da resistência de isolamento para três tipos de máquinas diferentes [3] . . . . .	43
3.5	Determinação aproximada do valor do coeficiente da resistência de isolamento, $K_T$ , para incrementos de 10 °C de temperatura. [4] . . . . .	46
5.1	Medida de temperatura e humidade ambiente . . . . .	68
5.2	Ligação das RTD/PT100 entre elas e à terra . . . . .	69
5.3	Medida da resistência de isolamento de 12 barras durante 1 min. Isoladas por NOMEX. As restantes estão ligadas à terra . . . . .	69
5.4	Detalhe da ligação superior das barras durante o ensaio. O topo das barras está isolado das restantes, mas as 12 barras estão ligadas electricamente entre si. . . . .	70
5.5	Medida da resistência de isolamento de 35 barras durante 1 min. isoladas por NOMEX. As restantes estão ligadas à terra . . . . .	73
5.6	Medida da resistência de isolamento da fase W do estator. . . . .	75
5.7	Medida da resistência de isolamento da fase W do estator - equipamento. . . . .	76
5.8	Equipamento para ensaio de alta tensão . . . . .	79

5.9	12 Barras a ensaiar com as ligações à terra levantadas e isoladas das adjacentes por Nomex. . . . .	79
5.10	Ensaio de alta tensão a 35 barras de topo do estator . . . . .	81
5.11	Ensaio de alta tensão ao enrolamento da fase U . . . . .	82
5.12	Ensaio de alta tensão ao enrolamento da fase V . . . . .	83
5.13	Medida da resistência entre barra e núcleo com ohmímetro . . . . .	84
5.14	Medida da resistência de isolamento das sondas de temperatura das ranhuras . . .	87
5.15	Comparadores instalados num polo . . . . .	88
5.16	Aperto do perno inferior de fixação de um polo . . . . .	88
5.17	Vista do interior da roda polar . . . . .	89
5.18	Aperto do perno inferior de fixação de um polo . . . . .	89
5.19	Introdução de um polo . . . . .	89
5.20	Limpeza dos polos com ar comprimido . . . . .	90
5.21	Ligações para a medida da resistência de isolamento . . . . .	90
5.22	Execução da medida da resistência de isolamento. . . . .	91
5.23	Valor obtido no ensaio de alta tensão. . . . .	92
5.24	Medida tensão total . . . . .	95
5.25	Medida tensão de um polo . . . . .	95
5.26	Ligação da alimentação . . . . .	95
5.27	Fonte de alimentação . . . . .	96
5.28	Resistência shunt. . . . .	96
5.29	Montagem para a medida . . . . .	96
5.30	Valores obtidos. . . . .	96
5.31	Montagem para verificação da polaridade . . . . .	97
5.32	Polaridade de um polo. . . . .	97

# Lista de Tabelas

3.1	Valores indicativos para a tensão de a ser aplicada durante a medida da resistência de isolamento. . . . .	42
3.2	Valores mínimos recomendados para o índice de polarização (I.P.) para todos os componentes da máquina de acordo com as classes de isolamento. [5] . . . . .	53
3.3	Valor mínimo recomendado para a resistência de isolamento a 40 °C (valores em MΩ). [6] . . . . .	54
3.4	Ensaio de Alta Tensão. [7] . . . . .	57
3.5	Ensaio de Alta Tensão (continuação). [7] . . . . .	58
5.1	Resultados das medidas da resistência de isolamento das barras de fundo do estator. . . . .	67
5.2	Resultados das medidas da resistência de isolamento das barras de fundo do estator. . . . .	71
5.3	Resultados das medidas da resistência de isolamento do enrolamento completo do estator. Valores em GΩ . . . . .	74
5.4	Resultados do ensaio de alta tensão às barras de fundo do estator . . . . .	78
5.5	Resultados do ensaio de alta tensão às barras de topo do estator . . . . .	80
5.6	Resultados do ensaio de alta tensão ao enrolamento completo do estator. . . . .	82
5.7	Medida da resistência das sondas de temperatura das ranhuras. . . . .	85
5.8	Medida da resistência das sondas de temperatura do núcleo. . . . .	86
5.9	Resultados da medida da resistência de isolamento das sondas de temperatura das ranhuras. . . . .	87
5.10	Medida da resistência de isolamento após 1 min. . . . .	91
5.11	Resultado do ensaio de alta tensão. . . . .	92
5.12	Cálculo da impedância do polo n.º 1 ao polo n.º 20. . . . .	93
5.13	Cálculo da impedância do polo n.º 21 ao polo n.º 40. . . . .	94
5.14	Resultados para cálculo da resistência do enrolamento rotórico. . . . .	96



# Abreviaturas e Símbolos

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
NPA	Nível Pleno de Armazenamento
NMC	Nível de máxima cheia
POC	Posto de observação e comando
REN	Rede Eléctrica nacional
DCS	<i>Decentralized control system</i>
PPCA	Posto privado de comutação automática
I.P.	Índice de Polarização
P.GEN QCxxx	Norma interna da empresa Andritz Hydro GmbH
VPI	<i>Vacuum Pressure Impregnation</i>
RTD	<i>Resistor Temperature Device</i>
Nomex	Marca registada de um tipo de papel sintético isolante
WWW	<i>World Wide Web</i>
UNGE	Unidade de Negócio de Gestão de Energia (EDP)
ONAN/ONAF	<i>Oil Natural Air Natural/Oil Natural Air Forced</i>
MD2	Valor para a constante de inercia do alternador-motor
NmEe	Nível mínimo de exploração excepcional
NmEn	Nível mínimo de exploração normal



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Instalação dos Alternadores - Motores

O objectivo desta dissertação é o de analisar a legislação no que diz respeito ao ensaio de recepção de alternadores, particularmente as normas aplicáveis e regulamentos internos como [8]. Selecciona-se uma máquina em relação à qual se executam os ensaios e comentam-se os resultados.

Dá-se ainda a conhecer na generalidade o empreendimento do Baixo Sabor onde se insere uma das quatro máquinas a ensaiar.

### 1.2 Selecção e Características de Projecto da Máquina a Ensaiar

Por uma questão de programa, optei por centrar o estudo e desenvolvimento da dissertação na máquina do grupo 2 (G2) do escalão de Jusante. Será a primeira a entrar em serviço e portanto a ser recebida e ensaiada na presença do cliente.

Apresentam-se de seguida as principais características de projecto do alternador-motor em causa.

O valor de 20 MVA, previsto para a potência do alternadores-motore, considerando o rendimento do mesmo igual a 98,5 % e o factor de potência estipulado de 0,9. O valor indicado para a tensão estipulada dos alternadores-motores é de 6 kV

O alternador deve poder fornecer a sua potência estipulada, com o factor de potência estipulado e à velocidade síncrona para qualquer valor da tensão entre 90 e 110% da sua tensão estipulada.

Quer funcionando como alternador quer como motor, a máquina não limita o funcionamento da turbina-bomba, a que está acoplado isto é: deverá poder funcionar sem sobrecargas, dentro dos limites do seu diagrama PQ relativo à água de refrigeração à temperatura de 25 °C, para qualquer regime de funcionamento da turbina-bomba.

As características estipuladas do alternador satisfará as condições e características da marcha normal e da marcha excepcional, não estando previsto o funcionamento em rede isolada.

### 1.2.1 Potência, factor de potência e tipo de serviço

O alternador foi dimensionado para serviço contínuo (tipo S1), de modo a não limitar o funcionamento da turbina.

As potências fornecidas e os factores de potência correspondentes serão sempre entendidos para serviço contínuo (tipo S1), à velocidade síncrona, para qualquer valor de tensão dentro dos limites da gama de regulação estipulada e sem ultrapassar os valores limites de temperatura e de aquecimento adiante fixados. O alternador deverá poder funcionar sem sobrecargas, dentro dos limites do seu diagrama PQ relativos à água de refrigeração à temperatura de 25 °C.

O factor de potência, com potência activa nominal, respeitará os seguintes valores mínimos:

- 0,9 indutivo;
- 0,95 capacitivo;

### 1.2.2 Tensão e frequência estipuladas

O valor estipulado da tensão do alternador é de 6 kV e a gama de regulação é de  $\pm 10\%$ .

O valor estipulado da frequência é de 50 Hz  $\pm 1,5$  Hz.

### 1.2.3 Velocidade e momento de inércia

A velocidade síncrona e a velocidade de embalamento serão as transmitidas directamente pela turbina.

O valor escolhido para a constante de inércia MD2 deverá respeitar o mínimo, que para o grupo, corresponde a  $MD2 = 2\,120\,tm^2$ , o qual resulta do estudo preliminar dos regimes transitórios efectuado.

### 1.2.4 Isolamento, temperaturas e aquecimentos

Classes térmicas de isolamento (segundo CEI 60 085):

- Do enrolamento do estator - F
- Do enrolamento do rotor - F

Temperatura e aquecimento dos enrolamentos do estator (medidos pelo método dos indicadores internos de temperatura):

- Temperatura máxima permanente - 125 °C
- Aquecimento limite - 85 K

Temperatura e aquecimento do enrolamentos do rotor (medição pelo método de variação de resistência):



- Temperatura máxima permanente - 120 °C
- Aquecimento limite - 80 K

Temperatura máxima da água de refrigeração à entrada dos permutadores de calor: 25 °C

Temperatura do ar de arrefecimento à saída dos permutadores de calor:  $\leq 40$  °C.

Os aquecimentos serão medidos em relação à temperatura do ar de arrefecimento à saída dos permutadores de calor.

### 1.2.5 Forma de onda da tensão e reactância

O factor de desvio da onda de tensão relativamente à forma de onda sinusoidal será  $< 5\%$ .

O factor harmónico telefónico será  $< 1,5\%$ .

A reactância subtransitória longitudinal saturada ( $X''_d$ )  $\geq 18\%$ .

## 1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. Inclui uma bibliografia e anexos.

O capítulo 1 trata da introdução, onde se faz uma descrição sumária do objectivo da dissertação.

No capítulo 2 apresenta-se succintamente o aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor, fazendo-se uma descrição dos diversos equipamentos constituintes de cada escalão indicando-se alguns dados de projecto.

O capítulo 3 descreve as normas aplicáveis e particulariza os aspectos mais relevantes de cada uma para a aplicação prática ao ensaio. Também se referem alguns conceitos teóricos que servirão para comentar os resultados.

O capítulo 4 lista o conjunto de ensaios a efectuar em obra aquando da recepção das máquinas onde também fica clara a referência da norma aplicável ao ensaio a realizar. Trata-se no fundo de um plano de inspecção e ensaios acordado com o cliente.

O capítulo 5 apresenta os ensaios efectivamente realizados em obra, a preparação dos mesmos, os cuidados em matéria de segurança de pessoas e bens, os resultados e as conclusões dos mesmo tendo em conta o que se explicou no capítulo 3.



## Capítulo 2

# O aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor

O aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor é constituído por duas barragens e duas centrais. A barragem de montante compreende dois grupos geradores de 76,5 Mw enquanto a de Jusante compreende a instalação de dois grupos de 18 Mw.

Neste capítulo apresentam-se ambos os aproveitamentos e dá-se a conhecer sucintamente a instalação dos alternadores

O Aproveitamento está situado no concelho de Torre de Moncorvo, distrito de Bragança, no troço inferior do rio Sabor, afluente da margem direita do rio Douro. É constituído por dois escalões, estando o de montante situado a cerca de 12,6 km da confluência do Sabor com o Douro e o de jusante que situa-se a pouco mais de 3 km da foz do rio Sabor [9].

### 2.1 Escalão de Montante

A configuração geral do escalão de montante consiste numa central em poço, alojando dois grupos reversíveis Francis de eixo vertical, localizada na margem direita imediatamente a jusante de dois curtos circuitos hidráulicos subterrâneos independentes e uma barragem abóbada com o coroamento situado à cota (236), em cuja parte central está instalado um descarregador de cheias do tipo lâmina livre, controlado por comportas e cujo corpo é atravessado por uma descarga de fundo.

A jusante da barragem, na continuação do soco de fundação, será construída uma bacia de recepção e dissipação de energia das lâminas de água descarregadas.

A albufeira criada pela barragem terá uma capacidade de cerca de 1095 hm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (234,00) correspondendo a uma área inundada de cerca de 2820 ha, e de cerca de 1124 hm<sup>3</sup> para o nível de máxima cheia (NMC) à cota (235,00) sendo a correspondente área inundada igual a cerca de 2860 ha.

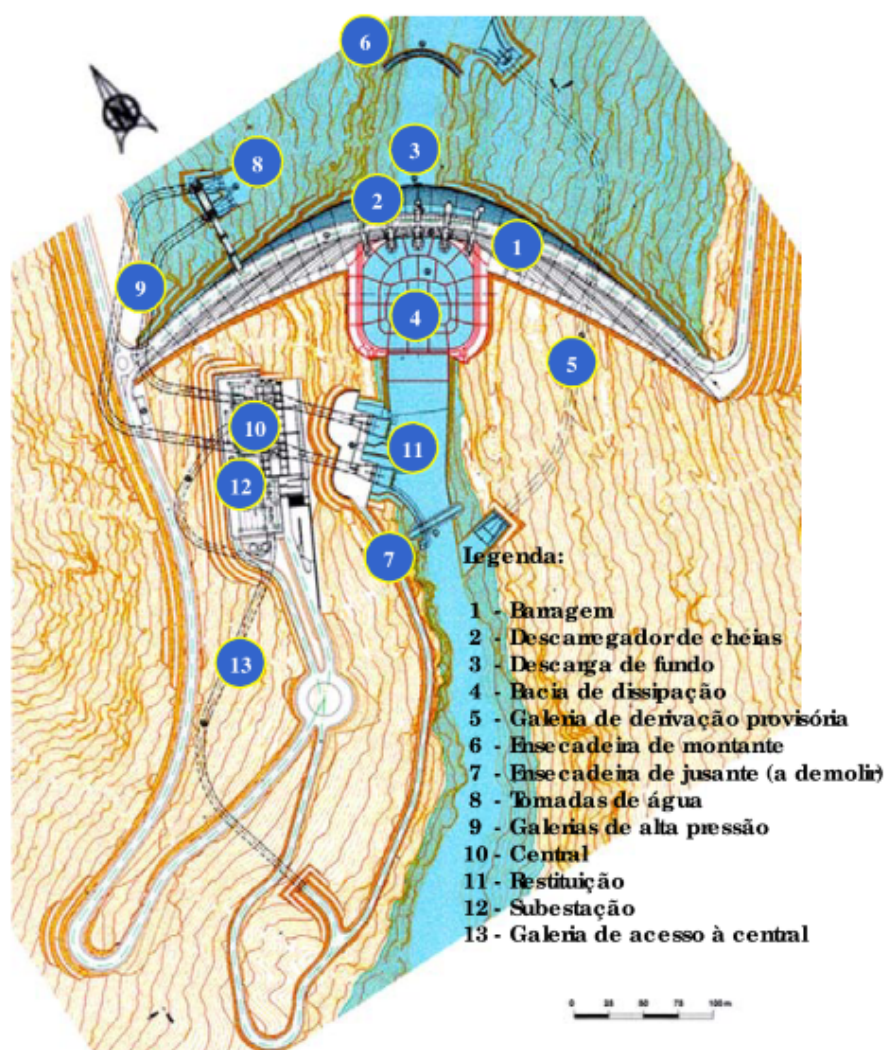


Figura 2.1: Desenho de implantação do escalão de Montante

## 2.2 Escalão de Jusante

O escalão de jusante é constituído por uma central em poço localizada na margem direita imediatamente a jusante da barragem, e alojando dois grupos reversíveis Francis de eixo vertical alimentados por circuitos hidráulicos subterrâneos independentes, e uma barragem do tipo gravidade com o coroamento à cota (140), construída com betão, em cuja parte central está instalado um descarregador de cheias controlado por comportas, cuja soleira se prolonga para jusante através de uma bacia de dissipação de energia.

Sobre os poços da central situa-se o piso de descarga e montagem, enterrado, e na plataforma à cota da cobertura da central localizar-se-ão o edifício de comando e a subestação.

A descarga de fundo fica instalada no muro lateral direito do descarregador de cheias.

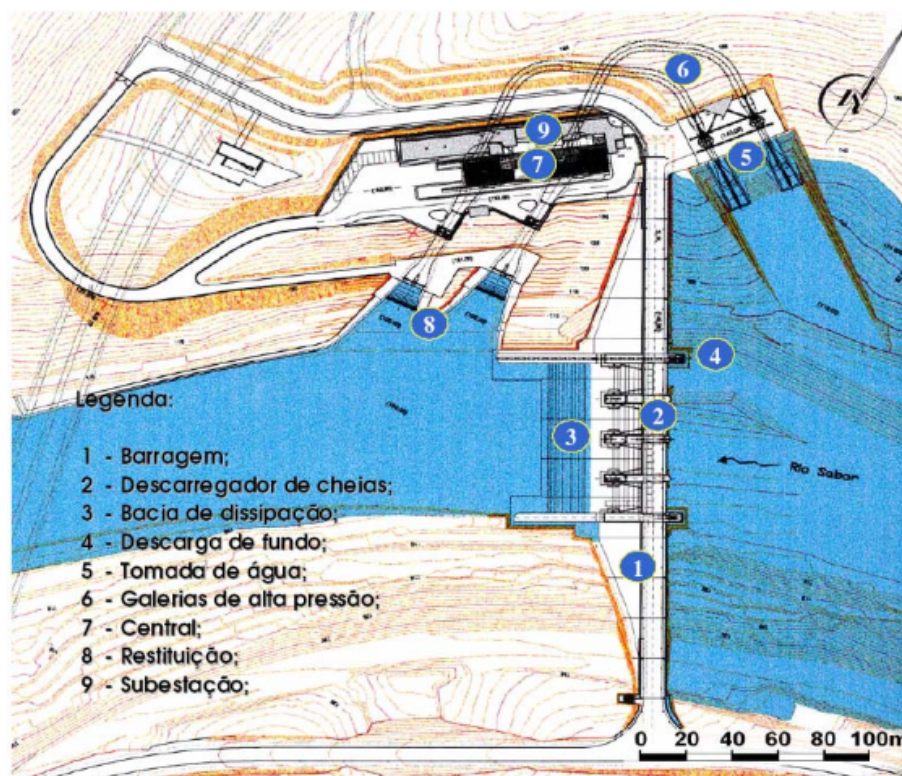


Figura 2.2: Desenho de implantação do escalão de Jusante

## 2.3 Concepção e descrição geral do escalão de Montante

### 2.3.1 Órgãos de descarga da barragem

Os órgãos hidráulicos de descarga da barragem do escalão de montante compreendem o descarregador de cheias e uma descarga de fundo.

#### 2.3.1.1 Descarregador de cheias

Tendo em conta as características da barragem (tipo e altura) e o risco potencial que lhe está associado (considerado elevado), a regulamentação portuguesa sobre segurança de barragens recomenda que o período de retorno da cheia de projecto deve ser fixado entre 5000 e 10 000 anos.

Assim, considerou-se aceitável dimensionar o descarregador para uma cheia de projecto com período de retorno de 5000 anos (à qual corresponde um caudal de ponta afluente de 6400 m<sup>3</sup>/s) e proceder à verificação do seu funcionamento para uma cheia com período de retorno de 10 000 anos.

Considerando o efeito regularizador da albufeira, entre o NPA=234 e o NMC=235, no amortecimento da cheia de projecto, resultou para o caudal máximo descarregado o valor de 5000 m<sup>3</sup>/s.

Na escolha e concepção da solução a adoptar para o descarregador de cheias foram tidos em conta não somente os aspectos referidos na regulamentação portuguesa sobre segurança de barragens mas ainda os seguintes factores: o regime de cheias no rio Sabor, a configuração topográfica do vale e as características geotécnicas do terreno no local da barragem, o tipo de barragem adoptada, a interferência com outros elementos de obra, o nível de máxima cheia (NMC) e os custos da solução.

Tendo em conta os factores referidos, optou-se por um descarregador do tipo lâmina livre sobre a parte central do coroamento da barragem, controlado por comportas, com bacia de recepção e dissipação no leito do rio imediatamente a jusante do pé da barragem. De assinalar, por outro lado, a possibilidade de dotar os descarregadores de cheias dos dois escalões do Aproveitamento Hidroeléctrico de Baixo Sabor com portadas com a mesma largura, obtendo assim uma apreciável economia de escala associada quer ao facto das comportas de serviço e elementos estruturais do viaduto rodoviário serem iguais nos dois casos, quer à existência de uma única comporta ensecadeira.

Os dispositivos de obturação e regulação do caudal que equipam as portadas do descarregador são constituídos por comportas segmento, com 16 m de largura e 12,25 m de altura, manobradas por servomotores hidráulicos articulados de simples efeito. Os respectivos postos de manobra situam-se no topo dos pilares das portadas extremas, em dois edifícios à cota (236,30), cada um albergando os postos de manobra das duas comportas adjacentes.

O ensecamento das portadas será efectuado por uma comporta ensecadeira do tipo corrediça, comum às quatro portadas quer deste descarregador, quer do descarregador do escalão de jusante. Os elementos do tabuleiro serão armazenados no escalão de jusante.

O viaduto que transpõe a zona do descarregador de cheias e se integra no coroamento da barragem tem o desenvolvimento total de 84 m e uma largura total de 11,3 m, sendo constituído por 4 tramos iguais de 16 m de vão útil. O tabuleiro é constituído por uma laje superior apoiada em vigas pré-fabricadas de betão pré-esforçado.

### **2.3.1.2 Descarga de fundo**

A concepção da solução a adoptar para a descarga de fundo atendeu aos aspectos referidos na regulamentação portuguesa sobre segurança de barragens e ainda aos seguintes factores: regime de afluências à barragem, curva de vazão a jusante da barragem, níveis de referência na albufeira em termos de segurança estrutural e ao tipo de barragem e descarregador de cheias.

A descarga de fundo fica localizada na prumada do pilar central do descarregador de cheias e é constituída, fundamentalmente, por uma galeria blindada que atravessa o corpo da barragem numa extensão de cerca de 30 m, com secção transversal rectangular (2,1 m x 3,1 m) e eixo horizontal (em quase toda a sua extensão) à cota (141,55). Está equipada a montante com uma comporta de guarda do tipo vagão e a jusante com uma comporta de serviço do tipo segmento. Dispõe de uma capacidade máxima de vazão de cerca de 220 m<sup>3</sup>/s sob o NPA.

A tomada de água da descarga de fundo está ligada em consola ao corpo da barragem, tem a crista da soleira à cota (140,00) e um desenvolvimento longitudinal de aproximadamente 5,8 m. A



secção é rectangular, tem à entrada uma altura de 7,8 m e uma largura de 5,1 m, convergindo para a secção corrente da galeria, sendo nesta secção que se encontra instalada a comporta de guarda, a qual se movimenta num plano ligeiramente inclinado em relação à vertical.

A galeria é blindada em toda a sua extensão, bem como o tubo de arejamento localizado imediatamente a jusante da comporta de guarda.

A parte final da galeria tem a soleira e o tecto ligeiramente inclinados para baixo e convergentes, sendo a altura da secção de saída de 2,8 m.

A estrutura de saída, onde está instalada a comporta de serviço do tipo segmento, está ligada em consola ao corpo da barragem e é constituída, fundamentalmente, por um canal de secção rectangular, cuja largura e inclinação da soleira são iguais às da parte terminal da galeria.

A comporta de guarda é movimentada por um servomotor hidráulico de simples efeito, instalado no topo do pilar central do descarregador à cota (236,20) sendo comandada a partir de um edifício junto do servomotor.

A comporta de serviço é movimentada por um servomotor hidráulico articulado de duplo efeito, instalado na plataforma à cota (150,00) sendo comandada a partir de uma câmara à cota (150,10) no interior da barragem.



Figura 2.3: Barragem do escalão de Montante, descarga de fundo e descarregadores de superfície



Figura 2.4: Barragem do escalão de Montante, descarregadores de superfície vistos de montante

### **2.3.2 Posto de observação e comando (POC)**

O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) requer o estabelecimento de medidas especiais com vista à protecção de pessoas e bens em caso de acidentes em barragens. Neste sentido e tendo em atenção o desenvolvimento do Plano de Emergência que vier a ser definido para a barragem do escalão de Montante do Baixo Sabor, foi prevista a instalação de um Posto de Observação e Comando (POC).

O POC estará direccionado para o controlo de segurança estrutural e para o controlo de segurança hidráulico-operacional da barragem. É no POC que estarão sedeadas as interfaces de comunicação com os sistemas de alerta e de aviso e com a instrumentação remota dos sistemas de observação e de monitorização de cheias.

### **2.3.3 Órgãos de exploração**

A solução adoptada para as obras de produção de energia eléctrica é constituída fundamentalmente por uma central do tipo poço, localizada na margem direita, equipada com dois grupos reversíveis instalados em poços independentes, e encimada por um edifício de descarga e montagem, e por dois circuitos hidráulicos, inseridos na margem direita, totalmente independentes e com traçados sensivelmente paralelos que atravessam o maciço rochoso sob a barragem. O edifício de comando localiza-se do lado do rio, contíguo ao edifício de descarga e montagem, e a subestação exterior, situa-se numa plataforma contígua ao edifício de descarga e montagem, do lado da encosta.



A concepção global do sistema constituído pela central e pelos circuitos hidráulicos atendeu ao tipo de barragem e sua implantação, ao tipo, dimensões e implantação do descarregador de cheias e bacia de dissipação, às condições topográficas e geológicas do local e ainda à cota de calagem dos grupos, aos níveis de exploração da albufeira e ao nível máximo atingido pela água a jusante, em períodos de cheia.

### **2.3.4 Circuitos hidráulicos**

#### **2.3.4.1 Considerações gerais e descrição**

Na implantação das diferentes componentes dos circuitos hidráulicos procurou-se encurtar a sua extensão, garantir cobertura rochosa suficiente às estruturas subterrâneas e manter um afastamento mínimo entre galerias, entre poços e entre estas estruturas subterrâneas e a fundação da barragem.

Esquemáticamente, e de montante para jusante, cada um dos circuitos hidráulicos é constituído por:

- uma tomada de água, composta por um bocal e uma torre de manobra dos equipamentos hidromecânicos;
- um curto troço em galeria sub-horizontal com 12% de inclinação;
- um poço inclinado a 60° com a horizontal, dotado de transições realizadas por curvas circulares com os trechos sub-horizontais com 12% de inclinação, superior e inferior;
- um troço em galeria sub-horizontal com 12% de inclinação, onde se inclui uma parte blindada;
- um curto elemento horizontal, também blindado, até à entrada da espiral do grupo;
- uma estrutura de restituição constituída por um curto troço de galeria inclinada a cerca de 32°, ligando o tubo de aspiração à restituição através de curvas circulares, e por um bocal.

#### **2.3.4.2 Tomada de água**

Tratando-se de um aproveitamento reversível, as tomadas de água dos circuitos hidráulicos funcionam como restituições nas situações de funcionamento em bombagem, ou seja, têm funções de tomada de água em turbinamento e de restituição em bombagem. No entanto estas estruturas serão designadas como tomadas de água.

A cota de implantação dos bocais das tomadas de água foi fixada tendo em conta critérios de definição das condições de submergência mínima com vista a garantir adequadas condições de funcionamento hidráulico para o nível mínimo de exploração excepcional da albufeira,  $NmEe = (205,50)$ . Cada tomada de água é constituída por um bocal com secção transversal rectangular, que faz a transição entre a secção da grade fixa (8,0 m x 11,25 m) e a secção do trecho onde se inserem a comporta e a ensecadeira (3,3 m x 6,0 m) através de formas circulares em planta e em

perfil, e por uma torre destinada ao abrigo e manobra do equipamento hidromecânico (ensecadeira e comporta de serviço do tipo vagão). Os servomotores a óleo para manobra das comportas ficam ao ar livre e os postos de manobra dos dois circuitos ficam abrigados em dois pequenos edifícios por cima de cada uma das torres.

As duas tomadas de água estão ligadas superiormente por uma plataforma com 7,3 m de largura, tendo acesso a partir do coroamento da barragem através de um viaduto com 4,3 m de largura, cujo tabuleiro, com 44,1 m de comprimento, está apoiado em dois pilares intermédios que definem três vãos iguais.

Sobre a referida plataforma desloca-se um pórtico rolante destinado à manobra da ensecadeira, única e utilizável em ambas as tomadas de água, e à remoção dos servomotores das comportas e à sua movimentação em caso de operações de manutenção destes equipamentos.

As torres de manobra da tomada de água possuem secção circular, com 7,0 m de diâmetro exterior e espessura mínima constante da parede exterior de 0,50 m, cuja secção interior foi condicionada pela passagem da conduta de arejamento blindada, com o diâmetro de 1,20 m, e pelas ranhuras de guiamento da comporta e da ensecadeira. Têm uma altura de cerca de 38 m, elevando-se até à cota (236,20), sendo encastradas na respectiva galeria e fundadas no maciço rochoso.



Figura 2.5: Escalão de Montante, tomada de água

#### **2.3.4.3 Galerias em carga**

As galerias em carga possuem um revestimento contínuo de betão simples ou armado, excepto num curto troço que se inicia a cerca de 55 m do eixo dos grupos, onde o revestimento será blindado para garantir a estanqueidade da central.

O diâmetro interior corrente das galerias em carga é de 5,7 m na zona revestida a betão e de 4,4 m na zona blindada.

Ao trecho revestido a betão segue-se o cone de transição para a secção blindada, igual nas duas galerias em carga, com comprimento total de 8,0 m, com os 3 primeiros metros em betão e os 5 restantes blindados.

O trecho corrente da blindagem tem a mesma definição geométrica nos dois circuitos hidráulicos, possuindo cerca de 33,4 m de extensão até ao início da transição cónica blindada para a entrada da espiral, cujo comprimento é de 8,0 m.

Para uma abertura da comporta da tomada de água de 0,1 m, estima-se que o tempo de enchimento da galeria em carga mais longa seja da ordem de 19, 21 e 33 minutos, para níveis na albufeira situados ao NPA, (234,0), ao NmEn, (227,4) e ao NmEe (205,5), respectivamente.



Figura 2.6: Escalão de Montante, início da galeria em carga



Figura 2.7: Escalão de Montante, comportas vagão da tomada de água

#### 2.3.4.4 Restituição

À semelhança do referido para a tomada de água, as estruturas de restituição dos caudais turbinados funcionam como tomadas de água em bombagem, adoptando-se aqui a designação de restituição para este elemento de obra.

O posicionamento das obras de restituição foi condicionado pela morfologia da encosta, pela compatibilização com a bacia de dissipação, pela submergência necessária ao seu funcionamento como tomada de água em bombagem, pela relação entre o emboquilhamento das obras subterrâneas e a secção da comporta, pela materialização da plataforma exterior dos servo-motores das comportas e pela estratégia de construção do aproveitamento em particular a posição da ensecadeira de jusante.

As galerias de restituição têm 33,8 m de desenvolvimento entre a saída do difusor e o início do quadrado – redondo, com secção transversal circular de 5,7 m de diâmetro interior. Possuem eixo

rectilíneo em planta, apresentando, em perfil longitudinal, um desenvolvimento em "S" definido por duas curvas circulares que realizam a transição entre o eixo da parte final do difusor e o trecho rectilíneo com 32° de inclinação e entre este trecho e o eixo da parte final do bocal que tem cerca de 12° de inclinação.

Às galerias de restituição seguem-se os bocais que fazem a transição entre a secção circular da galeria de restituição e a soleira de controlo a jusante, que materializa a fronteira com o leito do rio. As transições possuem formas hidráulicas adequadas por forma a permitir a inserção da comporta ensecadeira (5,7 m de largura e 7,5 m de altura), de tipo corrediça, destinada a pôr a seco toda a galeria de restituição, e da grade de protecção, também de tipo corrediça, constituída por dois painéis de 4,5 m x 10,0 m, materializados pela construção de um septo na parte final do bocal.

As grades de protecção são operadas por meio de grua móvel a partir da plataforma de manobra criada no topo das estruturas de guiamento e dos bocais de restituição à cota (145,00). As comportas são accionadas por servomotores instalados na mesma plataforma efectuando-se a sua movimentação sempre com águas equilibradas.

### **2.3.5 Central, edifício de descarga, montagem e comando e subestação**

#### **2.3.5.1 Implantação e concepção geral**

A solução adoptada para a central consiste na instalação dos dois grupos em poços independentes cobertos por um edifício destinado à descarga, montagem e movimentação dos equipamentos e ainda, às instalações auxiliares e de comando e controlo da central.

Contígua a este edifício e do lado da encosta situa-se a subestação. O conjunto formado pelo edifício de descarga, montagem e comando e pela subestação situa-se na margem direita a cerca de 100m a jusante da barragem.

Na concepção desta solução procurou aproximar-se a central da barragem, a fim de minimizar o comprimento dos circuitos hidráulicos, harmonizar o objectivo de minimização da altura dos poços com as exigências de traçado das galerias de restituição e aproximar o posto de transformação exterior da central.

Simultaneamente, procurou-se adaptar as grandes plataformas necessárias ao edifício de comando e à subestação à topografia do local e a disposição das obras subterrâneas às condições geomecânicas do maciço rochoso.

As obras subterrâneas da central são constituídas, essencialmente, por quatro tipos de elementos de obra de características distintas: os dois poços dos grupos, o poço de barramentos e de acesso, as galerias entre poços e as galerias de acesso às cotas (113,50) e (104,50).

Os poços dos grupos têm uma altura de cerca de 79 m, desenvolvendo-se entre as cotas (99,20) e (178,10), e possuem os eixos afastados entre si de 36 m. A sua secção transversal tem um diâmetro interior de 11,50 m. Os poços são cobertos por um edifício destinado à descarga, montagem e movimentação dos equipamentos e, ainda, às instalações de comando da central.

A secção mantém-se constante entre a cota (178,10) e o piso das fossas dos alternadores, à cota (117,80), após revestimento em betão armado com espessura de 1,00m.

A parte inferior dos poços destina-se à instalação dos grupos fazendo-se a montagem destes bem como a descida dos equipamentos de maiores dimensões através da sua parte superior.

Cada grupo reversível turbina bomba/alternador motor, com uma potência máxima de 81 MW e caudal nominal de 85 m<sup>3</sup>/s em turbinamento e 69,9 m<sup>3</sup>/s em bombagem tem o eixo coincidente com o do respectivo poço e tem o plano médio da roda à cota (111,00).

Na sua parte inferior, os poços dos grupos comunicam entre si através de duas galerias de grandes dimensões dotadas de vários pisos técnicos para alojar os equipamentos auxiliares.

Na galeria inferior previu-se o piso de drenagem, à cota (100,00) e o piso do equipamento de desafoamento, à cota (104,50), que aloja o referido equipamento e proporciona o acesso aos difusores dos grupos.

A galeria superior, de maiores dimensões, com 8,0 m de largura por 18,6 m de altura máxima, comporta os pisos da turbina, à cota (113,50), do alternador, à cota (117,50) e das instalações eléctricas auxiliares, às cotas (122,50) e (126,50). O acesso a estes pisos pode fazer-se através do poço de barramentos, por ascensor ou por escada. Os pisos situados à cota (104,5) e (113,5) têm, também, ligação ao exterior, à cota (147,00), através duma galeria e do seu ramal, que permitem o acesso rodoviário.

O poço de barramentos situa-se entre os poços dos grupos, desenvolve-se entre as cotas (92,00) e (174,10) e possui secção transversal rectangular. Para além dos barramentos, o poço permitirá a instalação de cabos, tubos, condutas de ventilação e a passagem de equipamento de pequenas dimensões.

Através dele faz-se, ainda, o acesso aos vários pisos das galerias entre poços. Serve, também, de depósito de águas de infiltração e para alojamento de um depósito para armazenagem de águas residuais.

A chegada de equipamentos às cotas (104,50) e (113,50) é conseguida através de galerias de acesso cuja concepção foi ditada pelas exigências impostas pelo veículo previsto para o transporte dos equipamentos.

Durante a fase de construção, estas galerias servirão também de acesso às frentes de ataque das bases dos poços dos grupos, do poço de barramentos e da caverna entre poços.

O emboquilhamento do troço inicial comum a estas galerias faz-se a jusante do edifício de descarga, montagem e comando, próximo do leito do rio, à cota (147,00). O troço inicial com 284 m de extensão possui secção em ferradura de hasteais rectos, com 5,25 m de altura, 5,00 m de largura de soleira e 5,50 de largura máxima. Aí bifurca-se em duas galerias de igual secção, com comprimentos de 166,3 m e 73,6 m que permitem os acessos àquelas cotas.

O edifício de descarga e montagem corresponde ao corpo volumoso do conjunto de todo o edifício, cobre uma área de 65,4x16,7m<sup>2</sup> e é servido por duas pontes rolantes que asseguram as manobras dos equipamentos pesados. Contíguo ao edifício de descarga e montagem, situado do lado do rio, projectou-se um corpo de menor porte que se destina a alojar os equipamentos de comando da central e os serviços auxiliares.

As áreas destinadas à descarga e montagem dividem-se em dois espaços: um, localizado entre a entrada do edifício e o poço do grupo 2, e outro, entre os poços dos grupos. Estas áreas e as dos poços dos grupos são cobertas pelos meios de movimentação de cargas que se apoiam em caminhos de rolamento à cota (188,60).

Entre a cota da área de descarga, (178,10), e a cota da subestação, (189,50), no prolongamento do poço de barramentos, estabeleceu-se uma comunicação vertical através da qual são conduzidos os barramentos e os cabos até à subestação. À cota (185,60) tem início uma galeria de cabos que estabelece uma ligação à barragem.

O edifício de comando desenvolve-se ao longo do edifício de descarga e montagem, em três pisos:

- piso à cota (174,10), reservado para a galeria de cabos, armazéns de peças de reserva, oficinas e um compartimento para os depósitos de combustível do grupo diesel-elétrico;
- piso à cota (178,10), de nível com o piso do edifício de descarga e montagem, previsto para as salas de quadros, de baterias, do conversor estático de frequência, do quadro de 30kV e da central diesel eléctrica;
- piso à cota (182,60), destinado a salas de comando, telecomunicações, equipamento de climatização, sala de reuniões, e ainda, a gabinetes de pessoal e arquivo.

A subestação dispõe-se numa única plataforma, à cota final de (189,50), adjacente à do edifício de descarga, montagem e comando, do lado da encosta, obtida à custa de uma grande escavação.

A plataforma da subestação, dada a proximidade do edifício de descarga, montagem e comando e da estrada de acesso, localizados a cotas inferiores, é dotada de muros de suporte nesse seu contorno que permite criar um desnível de 11,40m.

O acesso de pessoas à plataforma faz-se por escada, a partir do piso de descarga e montagem. O acesso de veículos ligeiros e o transporte dos equipamentos é feito por um ramal rodoviário que parte da estrada de acesso ao edifício de descarga, montagem e comando. Os transformadores principais serão instalados junto à torre de chegada dos barramentos, situada no topo superior do poço de barramentos e de acesso. Esta torre separará os dois transformadores principais e os correspondentes painéis de grupo que se desenvolverão perpendicularmente à parede divisória e em sentidos opostos.

A interligação entre os painéis de grupo será feita através de um barramento que se desenvolverá na mesma direcção dos painéis de grupo, mas a uma cota superior; uma das extremidades deste barramento faz-se a interligação com os painéis de linha que se desenvolverão na direcção perpendicular a anterior.

### **2.3.5.2 Enquadramento no sistema electroprodutor**

A central do escalão de montante, equipada com dois grupos reversíveis de 85 MVA, será, de acordo com a Rede Eléctrica Nacional (REN), integrada na Rede Nacional de Transporte ao nível



Figura 2.8: Acesso à central do escalão de Montante

de tensão de 220 kV, através de um novo painel a executar pela REN, na subestação do Pocinho. A interligação deste painel ao escalão será efectuada por uma linha simples de 220 kV.

Foi considerada a possibilidade de funcionar como central assistida de condução local, a acontecer durante o período de comissionamento e em situação de recurso, sendo totalmente equipada com os automatismos e dispositivos necessários para ser inteiramente conduzida à distância a partir do centro de telecomando da Régua.

A exploração automática do aproveitamento condicionada a imposição de nível, caudal, potência ou tensão, não foi considerada, dado caber ao Centro de Despacho da REN a selecção do regime de exploração da central.

No entanto, os grupos poderão trabalhar submetidos ao sistema de Regulação Secundário de Potência existente no Centro de Despacho da REN (teleregulação da potência activa) e ao despacho da UNGE.

Os grupos poderão ainda ser explorados nos regimes de compensação síncrona, não se admitindo a exploração em rede isolada ou como reserva girante.

### 2.3.5.3 Grupos e processos de arranque

Os dois grupos previstos para a central do escalão principal do Baixo Sabor, serão reversíveis, de eixo vertical, cada um constituído por uma turbina-bomba de um só andar e por um alternador-motor síncrono directamente acoplado. Atendendo à decisão de divisão do caudal a instalar (170 m<sup>3</sup>/s) por dois grupos, a sua potência unitária foi fixada em 76,5 MW / 85 MVA.

Como órgão de segurança e isolamento da turbina-bomba, escolheu-se a solução válvula cilíndrica, atendendo à geometria favorável da máquina.

A importância da bombagem na exploração do escalão, orientou a escolha dos processos de arranque em bomba no sentido de a mesma possibilitar o funcionamento simultâneo dos dois grupos em regime de bombagem e assegurar uma boa fiabilidade de arranque. As soluções escolhidas para satisfazer estes requisitos foram as seguintes:

- arranque de qualquer dos grupos, com roda desafogada, por conversor estático de frequência (processo de arranque preferencial);
- arranque em dorso-a-dorso síncrono com roda afogada, podendo qualquer dos grupos funcionar como lançador ou lançado (processo de recurso).

Cada grupo disporá, portanto, de modo a reduzir a potência do conversor estático de frequência, de um sistema de desafogamento da roda, que possibilitará, também, o funcionamento nos regimes de compensação síncrona.

#### **2.3.5.4 Instalações eléctricas principais**

**Instalação à tensão de produção -** A condução da energia entre os grupos e os respectivos transformadores, a circulação da energia, para arranque em sentido bomba, entre os grupos e entre estes e o conversor de frequência, e a alimentação, em derivação, da excitação dos grupos e dos serviços auxiliares é efectuada por um conjunto de aparelhagem e barramentos que se designou por instalação à tensão de produção e que contempla a utilização de barramentos nus de alumínio e de cobre e o recurso, sempre que possível, a celas blindadas de fabrico standard.

**Transformadores principais -** Os transformadores principais ou de grupo serão trifásicos (2x90 MVA), em banho de óleo, de arrefecimento ONAN/ONAF, para montagem exterior – integrando a subestação descrita no seguimento -, com tomadas no enrolamento de AT para comutação sem tensão. Serão do tipo "fases dissociadas", e incluem o fornecimento de um módulo de reserva. O transporte dos transformadores é assegurado pelo acesso que serve a subestação, e um conjunto de carris para posterior movimentação até às respectivas celas.

**Instalação de emissão de energia -** O equipamento que constitui a instalação à tensão de emissão, encontra-se implantada numa única plataforma à cota (189,50), adjacente ao edifício da central e apresenta a seguinte consistência:

- a ligação a 220 kV aos transformadores principais – painéis de grupo;
- espaço contemplando a saída para 2 linhas de 220 kV – painéis de linha – sendo uma para o Pocinho e a outra de reserva;
- a interligação dos painéis de grupo com o painel de linha.



**Instalação de comando e controlo -** O comando e controlo de todo o escalão será assegurado por um sistema de controlo único (DCS) caracterizado por uma arquitectura perfeitamente distribuída, física e funcionalmente, que integrará unidades de controlo principais e diversas unidades de campo com atribuições de controlo de grupos funcionais da instalação.

O sistema de controlo integrará consolas de comando que permitirão, de uma forma simplificada, operar localmente a instalação. Não se pretende que venham a existir painéis convencionais de comando local dos grupos, com excepção daqueles estritamente necessários por razões de segurança dos grupos ou para a realização de operações de sincronização manual. Para as instalações em que forem definidos quadros de comando local, estes terão como interface com o processo as unidades de campo que lhes estão associadas.

**Instalação dos serviços auxiliares gerais -** A fim de assegurar uma elevada continuidade da alimentação de energia aos serviços auxiliares, previram-se várias possibilidades alternativas de alimentação do quadro geral de baixa tensão, a partir das instalações de média e alta tensão (15, 30 e 220 kV), via transformadores 15 kV/0,4 kV e 30 kV/0,4 kV. Para alimentação de recurso/emergência foram considerados dois grupos diesel-eléctricos, com potências de 600 e 50 kVA, para a Central e Barragem, respectivamente, que assegurarão apenas os serviços considerados essenciais.

O modo de alimentação do quadro geral será normalmente, seleccionado pela unidade de campo afectada à gestão dos serviços auxiliares, segundo uma lista pré-estabelecida de prioridades das fontes de alimentação.

Servindo à alimentação da quase totalidade das instalações de comando e controlo e de alguns serviços auxiliares especiais, existirão as seguintes instalações de corrente contínua:

- uma, a 110 V, de âmbito geral;
- duas, a 24 V, sendo uma para cada grupo e destinada exclusivamente à alimentação das unidades de campo do DCS.

**Instalação de ventilação e climatização -** A instalação de ventilação visa garantir, por um lado, a renovação do ar dos diferentes espaços e, por outro lado, a remoção do calor, humidade, gases ou vapores libertos pelos equipamentos. Para assegurar a correcta ventilação de todos os locais, previram-se dois modos de ventilação, um por ar insuflado e um outro por ar aspirado.

Na sala de comando, sala de telecomunicações, gabinetes e sala de observação de estruturas, foram previstas instalações de climatização.

**Instalação de telecomunicações -** A instalação de telecomunicações terá por base uma central telefónica (PPCA) e um conjunto de infraestruturas telefónicas, baseada numa cablagem estruturada e permitindo a integração de voz e dados.

Para permitir o telecomando da central foi prevista a instalação de um caminho suportado em fibras ópticas entre a central e a Subestação do Pocinho, utilizando o cabo de guarda da linha de 220 kV a construir entre a central e a referida subestação.

**Aparelhos de elevação, movimentação de cargas e de pessoas -** Os principais meios de movimentação de cargas na central serão duas pontes rolantes com a capacidade nominal unitária de 100 t vencendo um vão de 15,5 m. A sua capacidade foi determinada pela movimentação do rotor do alternador-motor com a massa esperada de cerca de 185 t. Para a execução desta manobra, as duas pontes serão acoplados mecânica e electricamente e os respectivos ganchos ligados por um travessão (construção soldada tipo caixão, com olhais para engate dos ganchos e com um prato central para suspensão do rotor).

Para a movimentação de cargas ligeiras a velocidades mais elevadas, cada ponte disporá de um diferencial auxiliar de 12,5 t de capacidade, instalado em carro tipo mono-viga suspenso de uma das vigas principais.

Na plataforma das tomadas de água, à cota (236,20), ligada por um pequeno viaduto ao coroa-mento da Barragem, será instalado um pórtico rolante que terá por funções a manobra da comporta ensecadeira (tipo corrediça) e a manobra para manutenção das comportas de segurança( tipo va-gão) e dos servomotores que as movimentam.

Para o transporte de pessoas e pequenas cargas foram previstos dois ascensores eléctricos no escalão de montante, um na central e outro na barragem.

Na central o elevador serve os pisos entre as cotas (113,50) e a (178,10) e foi considerada uma capacidade de 1000 kg/13 pessoas.

Na barragem, implantado na zona central, o elevador serve os pisos entre as cotas (236,30 ) e (116,00) e foi considerada uma capacidade de 630 kg/8 pessoas.

**Instalação de segurança -** Na instalação de segurança foram considerados um conjunto de instalações parcelares relativas à protecção contra incêndio, intrusão e inundação, bem como as relativas à segurança eléctrica.

Foi considerada uma fonte para abastecer de água o sistema automático de protecção contra in-cêndio dos transformadores principais e a rede de incêndio armada, contemplando um reservatório de armazenamento e reserva de incêndio com um volume útil de 140 m<sup>3</sup>.

Para os alternadores-motores considerou-se um sistema de extinção de incêndios utilizando, em princípio, dióxido de carbono como agente extintor.

Nos transformadores principais será um sistema de extinção por projecção de água nebulizada, dimensionado para o combate a um incêndio num transformador, durante cerca de uma hora.

A detecção de inundação será obtida através de captadores de nível de água no poço da central e noutros locais julgados convenientes; a sua actuação desencadeará a sequência de paragem de emergência dos grupos através do automatismo de protecções.

As situações de incêndio no interior da central, detectadas por captadores adequados aos vários tipos de locais e de equipamentos, serão tratadas por uma central de alarme que sinalizará localmente, na sala de comando e junto à entrada da central.

A detecção de intrusão na central, na subestação e noutros locais importantes, será assegurada por um sistema automático provido de alarme sonoro local, interior e exterior, cuja central se localizará na sala do vigilante, complementada por um sistema de vídeo-vigilância.

Um eléctrodo de terra do tipo de fundação e um conjunto de condutores de terra assegurarão a ligação à terra dos pontos neutros de alta e baixa tensão e a ligação à terra das massas das instalações.

**Instalação de bombagem -** A central será dotada com uma instalação de bombagem e rede de tubagem que assegurará:

- a evacuação das águas provenientes de infiltrações e de fugas nos equipamentos;
- a evacuação das águas de lavagem dos filtros da instalação de refrigeração;
- esvaziamento do circuito hidráulico dos grupos reversíveis (conduta forçada, espiral, tubo de aspiração e galeria de restituição).

A barragem será igualmente dotada de uma instalação de bombagem e rede de tubagem que assegurará a evacuação das águas provenientes de infiltrações colectadas a partir da galeria geral de drenagem.

Esta galeria inclui um poço com soleira à cota (111,00), onde serão instaladas as electrobombas que elevarão à água para o nível de descarga à cota (150,10).

## **2.4 Concepção e descrição geral do escalão de Jusante**

### **2.4.1 Órgãos de descarga da barragem**

Os órgãos hidráulicos de descarga da barragem englobam o descarregador de cheias e uma descarga de fundo.

#### **2.4.1.1 Descarregador de cheias**

Tendo em conta as características da barragem (tipo e altura) e o risco potencial que lhe está associado (considerado significativo), de acordo com a regulamentação portuguesa sobre segurança de barragens o período de retorno da cheia de projecto podia ser fixado em 1000 anos. Contudo, tendo em atenção que no escalão de montante a cheia de projecto foi fixada para 5000 anos, por questões de segurança considerou-se este mesmo período de retorno no escalão de jusante.

Tendo em conta o reduzido volume da albufeira de jusante, considerou-se o nível de máxima cheia (NMC) coincidente com o nível de pleno armazenamento (NPA=138,00). Nestas condições,

o caudal de dimensionamento do descarregador do escalão de jusante corresponde ao máximo descarregado no escalão de montante, cujo valor é de 5000 m<sup>3</sup>/s.

A solução adoptada para o descarregador de cheias surgiu naturalmente face quer ao elevado valor do caudal a descarregar, quer ao tipo e altura da barragem. Optou-se por um descarregador de superfície, frontal e controlado por comportas, de lâmina aderente sobre o corpo da barragem.

Os dispositivos de obturação e regulação do caudal que equipam as portadas do descarregador são constituídos por comportas segmento, com 16 m de largura e 12,25 m de altura, manobradas por servomotores hidráulicos articulados de simples efeito.

Os respectivos postos de manobra situam-se no topo dos pilares das portadas extremas, em duas câmaras à cota (140,30), cada uma albergando os postos de manobra das duas comportas adjacentes.

O ensecamento das portadas será efectuado por uma comporta ensecadeira do tipo corrediça, comum às quatro portadas deste descarregador e, também, do descarregador do escalão de montante.

O viaduto que transpõe a zona do descarregador de cheias e se integra no coroamento da barragem tem as mesmas características do adoptado com idêntica função no Escalão de Montante.



Figura 2.9: Descarregadores de cheias - detalhe



Figura 2.10: Descarregadores de cheias - vista de montante



Figura 2.11: Descarregadores de cheias - vista de montante



Figura 2.12: Descarregadores de cheias - vista de jusante

### 2.4.1.2 Descarga de fundo

A concepção da solução a adoptar para a descarga de fundo atendeu aos aspectos referidos na regulamentação portuguesa sobre segurança de barragens.

O circuito hidráulico da descarga de fundo é constituído fundamentalmente por uma galeria de secção rectangular, com 1,25 m de largura e altura variável (2,0 m no troço inicial e 4,0 m no restante), soleira à cota (105,00) e desenvolvimento total de cerca de 84 m. O circuito termina com um “salto de ski” horizontal com lábio de saída à cota (105,00). A uma distância de 32 m da comporta de serviço existe um poço de arejamento de secção quadrada com 1,25 m de lado.

A tomada de água da descarga de fundo, com um desenvolvimento longitudinal de 4 m e secção rectangular, tem à entrada uma altura de 6,5 m e uma largura de 4,5 m, convergindo para uma secção de 2,0 m de altura e 1,25 m de largura.

Imediatamente a jusante da zona de actuação das comportas, a altura da galeria aumenta para 4,0 m, mantendo-se constante até final. O equipamento relativo à descarga de fundo inclui as comportas de guarda e de serviço e os respectivos órgãos de manobra e ainda a blindagem do troço em que actuam essas comportas.

A 4,2 m do paramento de montante tem início este troço blindado, com o comprimento de 3,5 m, onde se inserem as peças fixas de duas comportas do tipo vagão: a de montante será a de guarda e a de jusante de serviço. Ambas obturam a galeria e garantem o fecho de emergência da descarga de fundo.

Cada uma das comportas é movimentada por um servomotor hidráulico de simples efeito, instalado no coroamento da barragem à cota (140,30). A esta mesma cota situam-se os respectivos postos de manobra, instalados na câmara prevista para o efeito.

### 2.4.2 Posto de observação e comando (POC)

O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) requer o estabelecimento de medidas especiais com vista à protecção de pessoas e bens em caso de acidentes em barragens. Neste sentido e tendo em atenção o desenvolvimento do Plano de Emergência que vier a ser definido para a barragem do escalão de Jusante do Baixo Sabor, foi prevista a instalação de um Posto de Observação e Comando (POC).

O POC estará direccionado para o controlo de segurança estrutural e para o controlo de segurança hidráulico-operacional da barragem. É no POC que estarão sedeadas as interfaces de comunicação com os sistemas de alerta e de aviso e com a instrumentação remota dos sistemas de observação e de monitorização de cheias.

### 2.4.3 Órgãos de exploração

A configuração das obras de produção de energia é constituída por uma central, localizada na margem direita e equipada com dois grupos reversíveis alimentados por dois circuitos hidráulicos totalmente independentes, instalados em poços, inseridos na margem direita. Os edifícios de apoio e da subestação situam-se na mesma plataforma que permite o acesso aos poços da central.

Para a concepção global da central e dos circuitos hidráulicos foram tidos em consideração o tipo de barragem e sua implantação, o tipo, dimensões e implantação do descarregador de cheias e das respectivas estruturas de restituição e dissipação de energia e as condições topográficas e geológicas do local, bem como os níveis de exploração das albufeiras, o nível máximo atingido pela água a jusante, em períodos de cheia, dependente das condições de cheia no rio Douro, a cota de calagem dos grupos e as vias de comunicação existentes.

## **2.4.4 Circuitos Hidráulicos**

### **2.4.4.1 Considerações gerais e descrição**

Na implantação das diferentes componentes dos circuitos hidráulicos procurou-se aproximar, tanto quanto possível, a central da barragem de modo a encurtar a extensão das galerias em carga, garantir a suficiente cobertura de terreno sobre as estruturas subterrâneas e um afastamento mínimo de segurança entre galerias, entre poços e entre estas estruturas subterrâneas e a fundação da barragem.

Esquemáticamente, e de montante para jusante, cada um dos circuitos hidráulicos é constituído por:

- a uma tomada de água, constituída por um bocal, uma curta galeria de secção rectangular e um poço de manobra do equipamento hidromecânico;
- uma galeria em carga com inclinações de 10% e / ou 18%, em função do objectivo de garantir adequadas condições de afastamento na zona do seu cruzamento;
- um curto trecho em galeria horizontal, onde se inclui uma parte blindada, até à entrada da espiral do grupo;
- uma restituição constituída por um curto trecho em túnel e por um bocal.

A utilização das galerias como acesso de obra conduziu à adopção de uma secção transversal em ferradura modificada e à fixação de um diâmetro mínimo que garante uma largura na soleira compatível com a circulação de veículos de obra.

Com a adopção da solução de cruzamento das galerias em carga conseguiu-se um maior equilíbrio da inércia hidráulica dos dois circuitos hidráulicos uma vez que os respectivos comprimentos se assemelham, garantindo os pressupostos anteriormente definidos e originando condições de funcionamento idênticas quer nos regimes permanentes (perdas de carga) quer nos regimes transi-tórios (choque hidráulico, sobrevelocidades dos grupos, estabilidade de regulação).

### **2.4.4.2 Tomada de água**

Tratando-se de um aproveitamento reversível, as tomadas de água dos circuitos hidráulicos funcionam como restituições nas situações de funcionamento em bombagem, ou seja, têm funções

de tomada de água em turbinamento e de restituição em bombagem. No entanto estas estruturas serão designadas como tomadas de água.

A cota de implantação do bocal da tomada de água foi fixada tendo em conta critérios de definição das condições de submersão mínima com vista a garantir adequadas condições de funcionamento hidráulico para o nível mínimo de exploração da albufeira.

Cada tomada de água é constituída por um bocal com secção transversal rectangular, que faz a transição entre o plano da grade móvel, inclinado a 45° e com 7,5 m x 11,0 m, e a secção do trecho onde se inserem a comporta de serviço do tipo vagão e a ensecadeira (2,8 m x 5,1 m) através de formas circulares em planta e em perfil, e por um poço destinado ao abrigo e manobra do referido equipamento hidromecânico.

Os poços de manobra do equipamento hidromecânico das duas tomadas de água têm acesso à superfície a partir de uma plataforma situada à cota (140,00), realizada em escavação e com acesso directo a partir do encontro da margem direita da barragem. Nesta plataforma, encontra-se ainda um pórtico rolante destinado à manobra da ensecadeira, única e utilizável em ambas as tomadas de água, e à remoção dos servomotores das comportas e à sua movimentação em caso de operações de manutenção destes equipamentos.

Os referidos poços de manobra, revestidos a betão, possuem uma secção de escavação circular com diâmetro de 6,6 m e uma altura de 20,9 m, sendo o seu diâmetro interior de 5,6 m condicionado pela passagem da conduta de arejamento blindada, com 0,8 m de diâmetro, e das ranhuras de guiamento da comporta e da ensecadeira.



Figura 2.13: Tomada de água do escalão de Jusante

#### **2.4.4.3 Galerias em carga**

As galerias em carga possuem um revestimento contínuo de betão armado, excepto num curto trecho que se inicia a cerca de 25 m do eixo dos grupos, onde o revestimento será blindado para garantir a estanqueidade da central.

O diâmetro interior corrente da secção circular das galerias em carga é de 4,8 m na zona revestida a betão e de 3,75 m na zona blindada, sendo este último diâmetro igual ao de entrada da espiral.

O trecho de galeria com revestimento a betão tem uma extensão total de 109,9 m no circuito mais curto (grupo G1) e de 121,1 m no circuito mais longo (grupo G2).

A galeria do G1, a mais curta, possui inclinação constante e igual a 18% em toda a sua extensão e a galeria do G2 tem inclinação variável, 10% na sua parte superior e 18% na parte inferior.

Ao trecho revestido a betão segue-se o cone de transição para a secção blindada, igual nas duas galerias em carga, com comprimento total de 6,0 m, com os 2 primeiros metros em betão e os 4 restantes blindados. O trecho corrente da blindagem tem a mesma definição geométrica nos dois circuitos hidráulicos, possuindo cerca de 19,6 m de comprimento até à secção de entrada da espiral.

Para uma abertura da comporta da tomada de água de 0,1 m, estima-se que o tempo de enchimento da galeria em carga mais longa seja da ordem de 10 e 12 minutos, para níveis na albufeira situados ao NPA, (138,00), e ao NmE (130,00), respectivamente.

#### **2.4.4.4 Restituição**

À semelhança do referido para a tomada de água, as estruturas de restituição dos caudais turbinados funcionam como tomadas de água em bombagem, adoptando-se a designação de restituição para este elemento de obra.

O posicionamento e orientação das obras de restituição foram condicionados pelo objectivo anteriormente definido de redução da extensão dos circuitos hidráulicos, tendo em conta a morfologia do terreno, a proximidade da fundação e do corpo da barragem bem como a sua compatibilização com o muro da descarga de fundo, para além da garantia da submergência adequada no funcionamento em bombagem e a materialização da plataforma de acesso e manobra das grades.

Dada a concepção adoptada para a restituição e a necessidade de realizar adequadas transições entre as secções de saída do difusor, da comporta ensecadeira, da grade de protecção e do lábio de ligação ao rio, considerou-se um difusor com secção de saída rectangular ao alto, mantendo-se esta secção até à comporta ensecadeira.

A partir da saída do difusor e numa extensão de cerca de 27,9 m a secção transversal da curta galeria de restituição é rectangular com as dimensões correspondentes à secção a obturar pela comporta ensecadeira (5,0 m x 6,4 m), subindo no sentido do rio com uma inclinação de 16%.

Seguem-se os bocais de restituição que fazem a transição entre a secção rectangular do referido trecho em galeria e a soleira de controlo a jusante, que materializa a fronteira com o leito do rio. As transições possuem formas hidráulicas adequadas por forma a permitir a inserção da grade de



protecção, de tipo corrediça com dois painéis de 4,25 m x 8,0 m, materializados pela construção de um septo na parte final do bocal.

As comportas, do tipo corrediça, são accionadas por servomotores instalados na plataforma da central sobre o topo dos poços de manobra que albergam os respectivos guiamentos e condutas de arejamento, efectuando-se a sua movimentação sempre com águas equilibradas. As grades de protecção são manobradas por meio de uma grua móvel a partir de uma plataforma de manobra comum criada para o efeito à cota (121,00).

## **2.4.5 Central e edifícios de apoio e da subestação**

### **2.4.5.1 Implantação e concepção geral**

A central situa-se na encosta da margem direita do rio Sabor, cerca de 15,00 m a jusante da barragem, e é constituída por um piso de descarga e montagem enterrado e por dois poços circulares, um por cada grupo reversível, com diâmetro interior de 22 m, afastados entre eixos 40,00 m e cujo alinhamento se aproxima da orientação do curso do rio. A entrada na central é realizada a partir da plataforma à cota (133,00).

O piso de descarga e montagem, situado à cota (118,00), de planta rectangular, cuja cobertura se encontra à cota da plataforma exterior, é um espaço de grandes dimensões com um comprimento de 62,00 m e uma largura de 16,90 m. As superfícies verticais que o definem apresentam-se na sua maior parte não revestidas, mostrando a rocha em toda a sua nudez e textura, apenas intermitentemente interrompidas pelos pilares em “V” que sustentam as vigas da ponte rolante que serve a central em toda a sua extensão.

O transporte dos equipamentos é feito por estrada até à plataforma exterior de descarga, situada numa zona maciça contígua à estrutura de cobertura da central. Através de um pórtico rolante os equipamentos são descarregados, transportados e descidos até ao átrio de montagem, através de uma abertura para o efeito criada na cobertura, protegida com uma tampa metálica motorizada.

Os poços dos grupos comunicam entre si nos pisos principais através de galerias de pequena dimensão e incorporam os vários pisos técnicos destinados a alojar os equipamentos auxiliares, com as designações e cotas seguintes:

- piso de drenagem inferior, à cota (86,00);
- piso de drenagem superior, à cota (94,00);
- piso do equipamento de desafoamento e da refrigeração, à cota (97,00);
- piso da turbina e do alternador, à cota (103,00);
- piso das instalações eléctricas auxiliares, à cota (108,00);
- piso principal, destinado a descarga e montagem, à cota (118,00);
- piso da instalação do sistema de protecção contra incêndio (123,00)

- piso do equipamento de ventilação, à cota (128,00).

O acesso aos pisos faz-se por ascensor a partir do poço do grupo 2, ou por escada a partir de ambos os poços.

Ao nível da plataforma exterior situa-se um conjunto de edifícios interligados, na sua maior parte com uma altura equivalente a dois pisos, e implantados junto ao talude de escavação da referida plataforma, minorando os impactes visuais negativos resultantes do corte do terreno e do seu revestimento com betão projectado. O comprimento dos edifícios abrange a quase totalidade da extensão da plataforma, inserindo-se na morfologia do terreno e não ultrapassando a crista do talude.

Este conjunto é constituído por dois edifícios de apoio e pelo edifício da subestação localizado entre eles.

O edifício de apoio situado do lado do grupo 2 possui dois pisos e foi projectado para alojar as salas de quadros, de baterias, de telecomunicações e sanitários, no piso térreo, e para a sala de comando, gabinetes e sala de recepção, no piso superior. Este edifício incorpora o acesso aos pisos principais da central, por ascensor ou por escada, e ainda um espaço de estacionamento de viaturas.

O edifício de apoio situado do lado do grupo 1 foi concebido para alojar o conversor estático de frequência e respectivos transformadores de potência, quadro de 30kV e grupo diesel-elétrico de emergência da central. Em planta apresenta uma disposição em “L”, acompanhando a curva da estrada que dá continuidade ao coroamento da barragem.

O edifício da subestação, localizado entre os dois edifícios de apoio atrás descritos, é composto pelas celas dos transformadores principais e pelas celas dos painéis de grupo e do painel de linha.

O transporte dos transformadores é assegurado pelo pórtico rolante que serve a central, permitindo a sua colocação sobre carris para posterior movimentação até às celas localizadas no interior do edifício.

Procurou-se ainda que a subestação ficasse implantada entre os poços dos grupos para um melhor encaminhamento dos barramentos de ligação aos transformadores principais, o que originou a sua localização entre os dois edifícios de apoio. A interligação com a rede de 60 kV será estabelecida em cabo de 60 kV desde o seccionador de terra do painel de linha até ao pórtico da linha a construir entre o escalão de jusante e a Subestação do Pocinho.



Figura 2.14: Edifício de apoio e subestação do escalão de Jusante

#### 2.4.5.2 Enquadramento no sistema electroprodutor

A central do escalão de jusante será integrada na Rede de 60 kV através de um novo painel a executar pela REN na subestação do Pocinho, ao qual o escalão será ligado por uma linha a 60 kV.

Não está prevista a exploração dos grupos em rede isolada ou como reserva girante.

Na concepção do escalão foi considerada a possibilidade de funcionar como central assistida de condução local, a acontecer durante o período de comissionamento e em situação de recurso, sendo totalmente equipada com os automatismos e dispositivos necessários para ser inteiramente conduzida à distância a partir do centro de telecomando da Régua.

Os grupos poderão ainda trabalhar submetidos ao sistema de Regulação Secundário de Potência existente no Centro de Despacho da REN (teleregulação da potência activa) e/ou ao despacho da UNGE.

#### 2.4.5.3 Grupos e processos de arranque

Os dois grupos previstos para a central do escalão de jusante do Baixo Sabor, serão reversíveis, de eixo vertical, cada um constituído por uma turbina-bomba de um só andar e por um alternador-motor síncrono directamente acoplado. Dada a divisão do caudal a instalar (120 m<sup>3</sup>/s) por dois grupos, a sua potência unitária foi fixada em 18 MW / 20 MVA.

A importância da bombagem na exploração do escalão, orientou a escolha dos processos de arranque em bomba no sentido de a mesma possibilitar o funcionamento simultâneo dos dois grupos em regime de bombagem e assegurar uma boa fiabilidade de arranque. As soluções escolhidas para satisfazer estes requisitos foram as seguintes:

- arranque de qualquer dos grupos, com roda desafogada, por conversor estático de frequência (processo de arranque preferencial);
- arranque em dorso-a-dorso síncrono com roda afogada, podendo qualquer dos grupos funcionar como lançador ou lançado (processo de recurso).

Cada grupo disporá, portanto, de modo a reduzir a potência do conversor estático de frequência, de um sistema de desafogamento da roda.



Figura 2.15: Grupo 2 do escalão de Jusante - estátor instalado

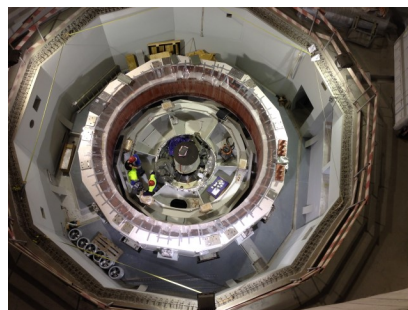


Figura 2.16: Grupo 2 do escalão de Jusante - cruzeta inferior montada

#### 2.4.5.4 Instalações eléctricas principais

**Instalação à tensão de produção -** A condução da energia entre os grupos e os respectivos transformadores, a circulação da energia, para arranque em sentido bomba, entre os grupos e entre estes e o conversor de frequência, e a alimentação, em derivação, da excitação dos grupos e dos serviços auxiliares é efectuada por um conjunto de aparelhagem e barramentos que se designou por equipamento à tensão de produção e que contempla a utilização de barramentos nus de alumínio e de cobre e o recurso, sempre que possível, a celas blindadas de fabrico standard.

**Transformadores principais -** Os transformadores principais ou de grupo serão trifásicos (2x20,5 MVA), em banho de óleo, de arrefecimento ONAN/ONAF, para montagem interior, com tomadas no enrolamento de AT para comutação sem tensão.

**Instalação à tensão de emissão -** O equipamento que constitui a instalação à tensão de emissão, para montagem interior, encontra-se implantada num edifício à cota (133,25), adjacente ao edifício de apoio e apresenta a seguinte consistência:

- a ligação a 60 kV aos transformadores principais – painéis de grupo;

- a saída de 1 linha (incluindo um troço em cabo) de 60 kV – painel de linha – para o Pocinho;
- piso do equipamento de desafoamento e da refrigeração, à cota (97,00);
- a interligação dos painéis de grupo com o painel de linha.

**Instalação de comando e controlo -** O comando e controlo de todo o escalão será assegurado por um sistema de controlo único (DCS) caracterizado por uma arquitectura perfeitamente distribuída, física e funcionalmente, que integrará unidades de controlo principais e diversas unidades de campo com atribuições de controlo de grupos funcionais da instalação.

O sistema de controlo integrará consolas de comando que permitirão, de uma forma simplificada, operar localmente a instalação. Não se pretende que venham a existir painéis convencionais de comando local dos grupos, com excepção daqueles estritamente necessários por razões de segurança dos grupos ou para a realização de operações de sincronização manual. Para as instalações em que forem definidos quadros de comando local, estes terão como interface com o processo as unidades de campo que lhes estão associadas.

**Instalação dos serviços auxiliares gerais -** A fim de assegurar uma elevada continuidade da alimentação de energia aos serviços auxiliares, previram-se várias possibilidades alternativas de alimentação do quadro geral de baixa tensão, quer a partir da instalação de 60 kV, via transformador 6 kV/0,4 kV, quer a partir da rede exterior de 30 kV, via transformador de 30 kV/0,4 kV. Para alimentação de recurso/emergência foram considerados dois grupos diesel eléctricos, com potências de 200 e 50 kVA, para a Central e barragem, respectivamente, que assegurarão apenas os serviços considerados essenciais.

O modo de alimentação do quadro geral será normalmente, seleccionado pelo autómato dos serviços auxiliares segundo uma lista pré-estabelecida de prioridades das fontes de alimentação.

Servindo à alimentação da quase totalidade das instalações de comando e controlo e de alguns serviços auxiliares especiais, existirão as seguintes instalações de corrente contínua:

- uma, a 110 V, de âmbito geral;
- duas, a 24 V, sendo uma para cada grupo e destinada exclusivamente à alimentação das unidades de campo do DCS.

**Instalação de ventilação e climatização -** A instalação de ventilação visa garantir, por um lado, a renovação do ar dos diferentes espaços e, por outro lado, a remoção do calor, humidade, gases ou vapores libertos pelos equipamentos. Para assegurar a correcta ventilação de todos os locais, previram-se dois modos de ventilação, um por ar insuflado e um outro por ar aspirado.

Na sala de comando, sala de telecomunicações e gabinetes foram previstas instalações de climatização.

**Instalação de telecomunicações -** A instalação de telecomunicações terá por base uma central telefónica (PPCA) e um conjunto de infraestruturas telefónicas, baseada numa cablagem estruturada e permitindo a integração de voz e dados.

Para permitir o telecomando da central foi prevista a instalação de um caminho suportado em fibras ópticas entre a central e a Subestação do Pocinho, utilizando o cabo de guarda da linha de 60 kV a construir entre a central e a referida subestação.

**Aparelhos de elevação, movimentação de cargas e de pessoas -** O principal meio de movimentação de cargas será uma ponte rolante com a capacidade nominal de 112 t e vencendo um vão de 13,90 m. Terá por funções a movimentação das peças no interior da central, quer nos poços dos grupos quer no átrio de montagem à cota (118,0). A sua capacidade foi determinada pela movimentação do rotor do alternador-motor com a massa esperada de cerca de 110 t.

Para a movimentação de cargas ligeiras a velocidades mais elevadas, a ponte disporá de um diferencial auxiliar de 12,5 t de capacidade, instalado em carro tipo mono-viga suspenso da viga principal.

A descida do equipamento entre a plataforma exterior de descarga à cota (133,0) e o átrio de montagem à cota (118,0) será assegurada por um pórtico rolante com a capacidade nominal de 40 t e vencendo um vão de 14,40 m.

A capacidade reduzida do pórtico resultou da opção pela formação das peças de maior peso no átrio de montagem da central, designadamente do rotor do alternador-motor. O seu valor foi ditado pela manobra de descida da cruzeta, com a massa esperada da ordem de 35 t.

Na plataforma das tomadas de água, à cota (140,00), com acesso directo pelo coroamento da Barragem, será instalado um pórtico rolante que terá por funções:

- a manobra dos elementos das grades de protecção(tipo vagão);
- a manobra da comporta ensecadeira (tipo corrediça);
- a manobra para manutenção das comportas de segurança (tipo vagão) e dos servomotores que as movimentam.

Para o transporte de pessoas e pequenas cargas foi previsto um elevador eléctrico na central , com a capacidade útil de 13 pessoas / 1000 kg.

**Instalação de segurança -** Na instalação de segurança foram considerados um conjunto de instalações parcelares relativas à protecção contra incêndio, intrusão e inundação, bem como as relativas à segurança eléctrica.

Foi considerada uma fonte para abastecer de água o sistema automático de protecção contra incêndio dos transformadores principais e a rede de incêndio armada, contemplando um reservatório de armazenamento e reserva de incêndio com um volume útil de 140 m<sup>3</sup>.

Para os alternadores-motores considerou-se um sistema de extinção de incêndios utilizando, em princípio, dióxido de carbono como agente extintor.

Nos transformadores principais será um sistema de extinção por projecção de água nebulizada, dimensionado para extinguir o incêndio de um transformador.

A detecção de inundação será obtida através de captadores de nível de água no poço da central e noutros locais julgados convenientes; a sua actuação desencadeará a sequência de paragem de emergência dos grupos através do automatismo de protecções.

As situações de incêndio no interior da central, detectadas por captadores adequados aos vários tipos de locais e de equipamentos, serão tratadas por uma central de alarme que sinalizará localmente, na sala de comando e junto à entrada da central.

A detecção de intrusão na central, na subestação e noutros locais importantes, será assegurada por um sistema automático provido de alarme sonoro local, interior e exterior, cuja central se localizará na sala do vigilante, complementada por um sistema de vídeo-vigilância.

Um eléctrodo de terra do tipo de fundação e um conjunto de condutores de terra assegurarão a ligação à terra dos pontos neutros de alta e baixa tensão e a ligação à terra das massas das instalações.

**Instalação de bombagem -** A central será dotada com uma instalação de bombagem e rede de tubagem que assegurará:

- a evacuação das águas provenientes de infiltrações e de fugas nos equipamentos;
- a evacuação das águas de lavagem dos filtros da instalação de refrigeração;
- a evacuação das águas de fuga do circuito de irrigação da junta do veio das turbinas-bombas;
- esvaziamento do circuito hidráulico dos grupos reversíveis (conduta forçada, espiral, tubo de aspiração e galeria de restituição).

## 2.5 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado de uma forma genérica o aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor. Analisou-se a envolvimento do projecto no contexto da região, tendo-se referido a instalação dos diversos equipamentos a diversas cotas referenciadas ao nível médio da água do mar frequentemente designado por masl (*meters above sea level*).

Conclui-se que o escalão de montante tem uma potência instalada cerca de 4 vezes superior ao escalão de jusante, por outro lado o poço do escalão de montante tem quase o dobro de profundidade do de jusante, o coroamento é em abóbada ao invés do de jusante que é do tipo gravidade.

O aproveitamento hidroeléctrico de jusante no fundo serve de contra-embalse ao de montante, criando a cota necessária a jusante da central do escalão de montante, para que os grupos reversíveis possam funcionar como bomba (modo motor).

Da mesma forma a central de jusante assegura o funcionamento como bomba, mediante a cota de água regulada a jusante deste aproveitamento pela central do Pocinho localizada no rio Douro imediatamente a jusante deste escalão.

Neste capítulo conclui-se ainda que o alternador-motor, objecto de análise nesta dissertação, representa apenas cerca de 1/10 do conjunto de equipamentos associados ao empreendimento.

Refere-se ainda um novo equipamento agora tornado obrigatório pela legislação no âmbito da protecção civil, o posto de observação e comando (POC). Trata-se de um equipamento fundamental para aviso e alerta das populações na eventualidade de alguma falha grave nos diversos órgãos de protecção da barragem e central, como sejam, comportas de serviço, descargas de fundo, descarregadores de cheias, estrutura da barragem, níveis de água a montante e a jusante de cada aproveitamento. O aviso e alerta é feito mediante a difusão sonora, ao longo de cerca de 20 km para montante e jusante de cada aproveitamento, de mensagens de perigo e/ou evacuação das zonas potencialmente afectadas.

Embora se tomem todas medidas possíveis para tornar o ambiente de montagem dos alternadores o mais limpo possível, neste tipo de aproveitamentos novos as condições estão muito longe de serem as ideais, já que por questões de programa existem sempre simultaneidades de trabalhos electro-mecânicos com os da construção civil que geram poeiras e humidades, altamente prejudiciais a uma montagem que se quer isenta desses elementos prejudiciais ao bom isolamento. Procura-se sempre que possível executar o máximo de trabalho em fábrica mas as dimensões destes alternadores, de baixa rotação e potências elevadas, não possibilita o transporte de estátor e por vezes rotor completos. Frequentemente os estátores e por vezes os rótores são empilhados em obra pelas questões de dimensões que referimos.



## Capítulo 3

# Normas IEEE, IEC e outras aplicáveis ao ensaio de Alternadores

Nos ensaios do alternador-motor, são aplicadas as normas IEEE e IEC, designadamente a IEC 60 034 “Rotating Electrical Machines” e as recomendações da publicação IEEE nº 115: “*Test Procedures for Synchronous Machines*”. De uma forma sistematizadas as normas aplicáveis são:

- IEC 60034-4, 6.3
- IEEE 115, 3.1 e IEEE 43
- IEC 60034-1, 9.2
- ISO 7919-5 Zone A
- IEC 60034-4, 6.5
- IEC 60034-4 6.20
- IEC 60034-4 6.12
- IEC 60034-4 6.4
- IEEE 115, 3.7.2
- IEC 60034-1, 9.11
- IEEE 115, 3.6
- ISO 1680
- IEC 60034-4 6.8
- IEC 60034-4.71/ 2000
- IEC 60034-1, 8

- IEC 60034-2.17
- IEC 60034-4, 6.25

Cada uma destas normas está associada a um ou mais procedimentos de ensaios que descreverei mais à frente.

Optamos por fazer agora um enquadramento genérico de cada uma das norma aplicáveis.

### 3.1 Normas IEEE 115, 3.1 e IEEE 43

As normas IEEE 115, 3.1 e IEEE 43 estabelecem o princípio da medida da resistência de isolamento. A medida da resistência de isolamento tem sido recomendada como forma de avaliação das condições do isolamento eléctrico pelo que a sua medida e registo periódicos ao longo de meses e anos de serviço revela-se da maior importância quando queremos concluir sobre o estado e evolução do isolamento eléctrico da máquina. As normas aqui em referência aplicam-se a máquinas rotativas de potência igual ou superior a 750 W ou 1 CV e entre outras às máquinas síncronas como as objecto deste trabalho.

O propósito destas normas é:

- Definir a resistência de isolamento e o índice de polarização no ensaio da bobinagem de uma máquina rotativa
- Verificar quais os factores que podem afectar ou alterar as características da resistência de isolamento.
- Recomendar uma uniformização das condições de ensaio.
- Recomendar uma uniformização dos métodos de medida da resistência de isolamento e precauções a tomar para evitar erros.
- Providenciar uma base para interpretação de resultados do ensaio da medida da resistência de isolamento no sentido de se estimar se a bobinagem é adequada à entrada em serviço ou se é necessário um ensaio de alta tensão. Particulariza ainda alguns problemas de isolamento típicos detectados pela medida da resistência de isolamento.
- Apresenta ainda valores mínimos aceitáveis para os valores da resistência de isolamento e índice de polarização para vários tipos de máquinas rotativas.

#### 3.1.1 Definições

##### 3.1.1.1 Corrente de absorção (polarização) - $I_a$

Define-se como a corrente, resultante da polarização de um movimento de electrões, que cresce de forma exponencial com o tempo de aplicação da tensão que a origina. Esta corrente começa por ser elevada decaindo para valores próximo de 0, dependendo do tipo de materiais isolantes utilizados no enrolamento.

**3.1.1.2 Corrente de condução -  $I_G$** 

Define-se como a corrente constante no tempo que percorre a massa de isolamento desde a terra até ao ponto de mais alto potencial, e que depende do tipo de material utilizado no sistema de isolamento.

**3.1.1.3 Resistência de isolamento -  $I_R$** 

Define-se como a capacidade do isolamento eléctrico de um enrolamento resistir á corrente directa. Define-se como o quociente entre a tensão de polaridade negativa e a corrente que percorre o isolamento da máquina, corrigida para 40 °C obtida num determinado instante de tempo (t) desde o início da aplicação da tensão. Normalmente este tempo corresponde a 1 min ( $I_{R1}$ ) ou 10 min ( $I_{R10}$ ).

**3.1.1.4 Corrente capacitiva geométrica -  $I_c$** 

Define-se como uma corrente reversível de valor elevado mas curta duração, que decresce exponencialmente com o tempo de aplicação da tensão, e que depende da resistência interna do equipamento de medida e da geometria de capacidade da bobinagem.

**3.1.1.5 Índice de Polarização -  $I.P.t_{10}/t_1$** 

Define-se como a variação do valor da resistência de isolamento como tempo. É o quociente do valor da resistência de isolamento medido num tempo  $t_1$  pelo valor da resistência de isolamento medido num tempo  $t_2$ , ou seja  $I_{Rt1}/I_{Rt2}$ . Habitualmente toma-se  $t_1 = 10$  min e  $t_2 = 1$  min.

**3.1.1.6 Corrente de fugas superficial -  $I_L$** 

Define-se como uma corrente constante no tempo que aparece normalmente nas superfícies das voltas (curvas) das bobinas do estator ou entre condutores expostos e o corpo do rotor na bobinagem isolada do rotor. O valor desta corrente depende da temperatura e da quantidade de material condutor, isto é, humidade ou contaminação de superfície isolante.

**3.1.2 Considerações sobre segurança**

A medida da resistência de isolamento envolve a aplicação de tensões elevadas directas à bobinagem da máquina. Esta bobinagem tem propriedades capacitivas e indutivas que podem conduzir a acidentes. Por este motivo antes da realização de qualquer teste a bobinagem tem de ser descarregada. Não é seguro iniciar o ensaio sem que a corrente de descarga seja 0 e que a tensão seja também próxima de 0 (menos do que 20 V) depois de remover a ligação á terra para se iniciar o ensaio. Após a realização do ensaio, a bobinagem deve ser novamente descarregada através de uma resistência adequada dimensionada para uma corrente instantânea de 1 A. Deve ser observado um tempo de descarga mínimo igual a quatro vezes o tempo de aplicação da tensão. Este

intervalo de tempo é baseado nas características de resistência (R), indutância (L) e capacitância (C) e características de absorção do circuito durante a carga (tempo de aplicação da tensão) e descarga (tempo decorrido entre a retirada de tensão e a subsequente ligação à terra da bobinagem em ensaio). É importante referir que o ensaio não está concluído que o ensaio não se considera concluído sem que a bobinagem seja completamente descarregada e não exista tensão apreciável no circuito. É ainda recomendado que subsequentes testes de alta tensão não sejam realizados sem que a bobinagem seja completamente descarregada. Durante o período de ensaios, todas as medidas de segurança apropriadas às tensões em uso devem ser tomadas. Para tensões iguais ou superiores a 5000 V os condutores das pinças dos equipamentos de medida ligados à bobinagem têm de ser devidamente isolados e afastados das massas e terra, já que de outra forma poderemos ter correntes de fuga superficial e perdas por efeito de corona que conduzirão a erros de medidas. Por razões de segurança e para evitar medidas de correntes induzidas, esses condutores devem ser blindados. É obrigatório a acesso restrito de pessoas quando se realizam ensaios com altas tensões. É obrigatório o uso de equipamento de protecção adequado, como varas de manobra, escadas isoladas, etc. Se acessíveis, os pontos neutros de cada fase e os extremos da bobinagem devem ser electricamente interligados entre si durante o ensaio por forma a minimizar efeitos de reflexões de altas tensões que podem resultar de uma eventual falha de isolamento. Estas são apenas algumas recomendações de segurança indicativas mas de alguma forma limitativas.

### 3.1.3 Resistência de isolamento – teoria geral

A resistência de isolamento da bobinagem de uma máquina rotativa é função do tipo e estado do material isolante utilizado, bem como da sua técnica de aplicação. De uma forma genérica a resistência de isolamento varia proporcionalmente com a espessura de isolamento e inversamente com a área superficial do condutor (barras). Mais à frente faremos uma interpretação das medidas da resistência de isolamento das bobinagens da máquina assim como os valores recomendáveis mínimos para o índice de polarização e resistência de isolamento.

#### 3.1.3.1 Componentes da corrente directa medida

Por definição, a resistência de isolamento é o quociente da tensão directa aplicada ao isolamento e a corrente total resultante num determinado tempo. A corrente total resultante ( $I_T$ ) é a soma de quatro correntes diferentes: Uma corrente superficial de fugas ( $I_L$ ), uma corrente geométrica de capacitância ( $I_C$ ), uma de condução ( $I_G$ ) e uma corrente absorvida ( $I_A$ )

A figura 3.1 abaixo ilustra um circuito equivalente para as várias correntes em jogo na medida da resistência de isolamento.

A corrente geométrica de capacitância ( $I_C$ ) habitualmente não afecta a medida, porque desaparece antes de efectuada a primeira medida aos 1 min.

A corrente absorvida ( $I_A$ ) ou corrente de polarização decresce exponencialmente seguindo a forma:

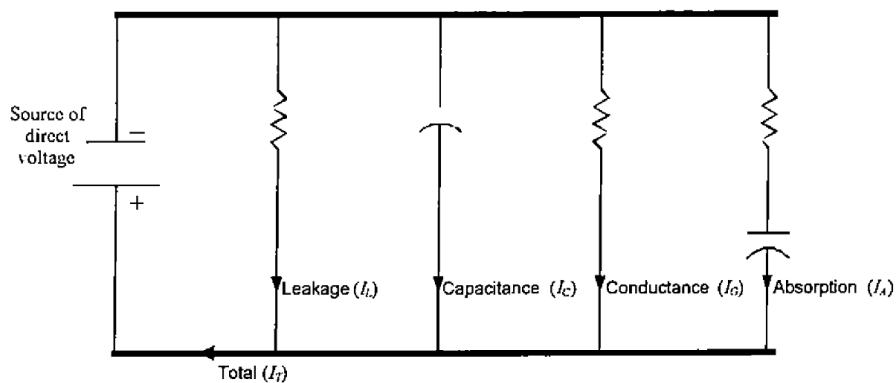


Figura 3.1: Circuito equivalente representando a quatro correntes em jogo durante o ensaio da resistência de isolamento [1]

$$I_A = Kt^{-n} \quad (3.1)$$

Onde:

$I_A$  -> é a corrente absorvida

$K$  -> é função das características do isolamento e da tensão de ensaio aplicada

$t$  -> é o tempo de aplicação da tensão directa

$n$  -> é função das características do sistema isolante.

A corrente absorvida tem duas componentes. A primeira é devida à polarização do material impregnante por causa das moléculas orgânicas, como a resina epoxy, polyester, asfalto que tendem a alterar a o sentido do campo eléctrico directo. Como essas moléculas têm de vencer a força de atracção que as une ás outras moléculas, é habitual que demore alguns minutos após a aplicação do campo eléctrico para que as moléculas se re orientem e portanto para que a corrente de polarização venha reduzida até quase zero. A segunda componente da corrente absorvida é devida ao movimento gradual de iões e electrões através dos materiais. Estes iões e electrões vagueiam até ficarem aprisionados nas superfícies de mica habitualmente encontradas no isolamento das máquinas eléctricas rotativas.

Normalmente para isolamentos de máquinas limpos e sem humidades, a resistência de isolamento entre os 30 seg. e alguns minutos é principalmente determinada pela corrente de absorção.

Como a corrente de absorção é uma propriedade do material isolante e da temperatura da bobinagem, uma corrente de absorção específica por si só não se entende como bom ou mau. Em alguns sistemas de isolamento baseados em polyester termo injectado ou resina de epoxi enfitada, o valor do expoente  $n$  da equação anterior da corrente  $I_A$  é diferente do encontrado para isolamentos mais primitivos termoplásticos como o asfalto. Isto não implica que isolamentos mais modernos

sejam melhores porque a corrente de absorção é menor e a resistência de isolamento encontrada será maior. Por exemplo o polietileno não tem praticamente corrente de absorção, no entanto devido à sua limitação no comportamento à temperatura seria completamente inadequado à aplicação como sistema de isolamento de máquinas rotativas.

A corrente de condução – ( $I_G$ ) em sistemas de isolamento baseados em poliéster enfitado e resina de epoxi-mica é virtualmente zero, a não ser que o isolamento esteja saturado com humidade. Sistemas de isolamento mais antigos como asfalto-mica podem ter uma corrente de condução mais elevada devido à condutividade das fitas sobre a mica.

A corrente de fugas superficial ( $I_L$ ) é constante no tempo. Uma corrente de fugas superficial elevada, isto é, baixa resistência de isolamento, é habitualmente causada por humidade ou outro tipo de contaminação de condução presente na máquina.

### 3.1.3.2 Características da corrente directa medida

Comparando a variação da resistência de isolamento ou a corrente total durante a aplicação da tensão no ensaio, pode ser útil para avaliar o grau de limpeza e secura da bobinagem. Se a bobinagem está contaminada ou húmida, a corrente total  $I_T$  será aproximadamente constante no tempo já que  $I_L$  e/ou  $I_G$  (Figura 3.2) serão maiores do que a corrente absorvida ( $I_A$ ). Se a bobinagem está limpa e seca, a corrente total  $I_T$  normalmente decrescerá com o tempo (Figura 3.3), já que a corrente total é maioritariamente a corrente de absorção (i.e., polarização)  $I_A$ .

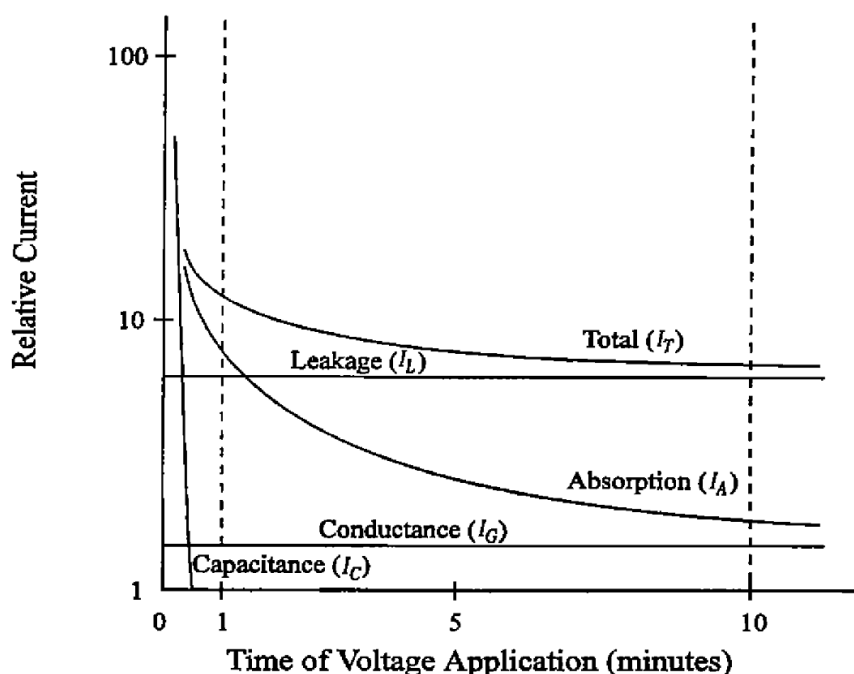


Figura 3.2: Curvas de correntes para um isolamento asfalto-mica [1]

### 3.1.3.3 Medidas da resistência de isolamento

A medida da resistência de isolamento caracteriza-se pela aplicação de uma tensão directa à bobinagem, tensão essa que tem de ser limitada pelas características da tensão nominal da bobinagem e as condições básicas de isolamento existentes. Isto torna-se mais importante no caso particular de máquinas de baixa tensão ou máquinas que apresentam humidade no enrolamento. Se o nível de tensão aplicado no ensaio for demasiado alto, pode solicitar em demasia o isolamento conduzindo a uma falha de isolamento.

As medidas da resistência de isolamento são habitualmente conduzidas com uma tensão constante entre 500 e 10000 V com polaridade negativa. A polaridade negativa é preferível para evitar a interferência de fenómenos de electroendosse. Na Tabela 3.1, são apresentados valores possíveis para a tensão de ensaio a utilizar na medida. As leituras das medidas de isolamento são registadas após a aplicação da tensão durante 1 min.

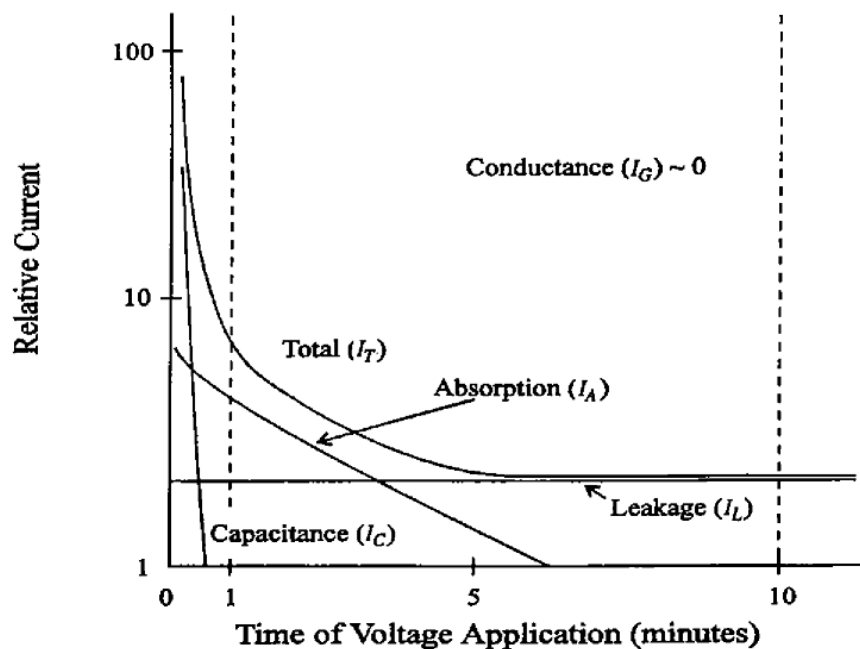


Figura 3.3: Curvas de corrente para um isolamento epoxi-mica com baixa corrente superficial de fugas e corrente de condução próxima de zero [2]

Tensão nominal (fase-fase) da Bobinagem (V)	Tensão directa aplicada na medida da resistência de isolamento (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Tabela 3.1: Valores indicativos para a tensão dc a ser aplicada durante a medida da resistência de isolamento.

#### 3.1.3.4 Leitura do índice de polarização (I.P.)

A medida da resistência de isolamento vai habitualmente subir rapidamente quando a tensão é aplicada inicialmente, e depois vai decaindo para um valor aproximadamente constante com o tempo conforme podemos observar na figura 3.4. As leituras de um isolamento seco e em boas condições podem continuar a subir durante horas com a aplicação de uma tensão constante de ensaio. Para isolamentos mais antigos é obtida uma razoável medida da resistência de isolamento num intervalo entre 10 e 15 min após o início da medida. Nos isolamentos mais modernos utilizando epoxi-mica ou poliéster-mica podemos obter um valor constante para a medida da resistência de isolamento após 4 min ou menos. Se a bobinagem apresentar indícios de humidade ou sujidade, obtemos um valor baixo mas constante para a medida da resistência de isolamento decorridos 1 ou 2 min da aplicação da tensão.

O índice de polarização (I.P.) é definido pelo quociente entre o valor da resistência de isolamento após 10 min ( $I_{R10}$ ) e o valor da resistência de isolamento após 1 min ( $I_{R1}$ ). O índice de polarização dá-nos a inclinação da curva de característica (ver Figura 3.4) e pode ser utilizada para verificar as condições do isolamento como indicaremos mais a frente.

No sentido de se obter maior precisão na medida em torno do 1 min, é também habitual registarem-se medidas noutros intervalos como 15 seg., 30 seg., 45 seg., 1 min, 1.5 min, 2 min, 3 min, 4 min, ..... e 10 min



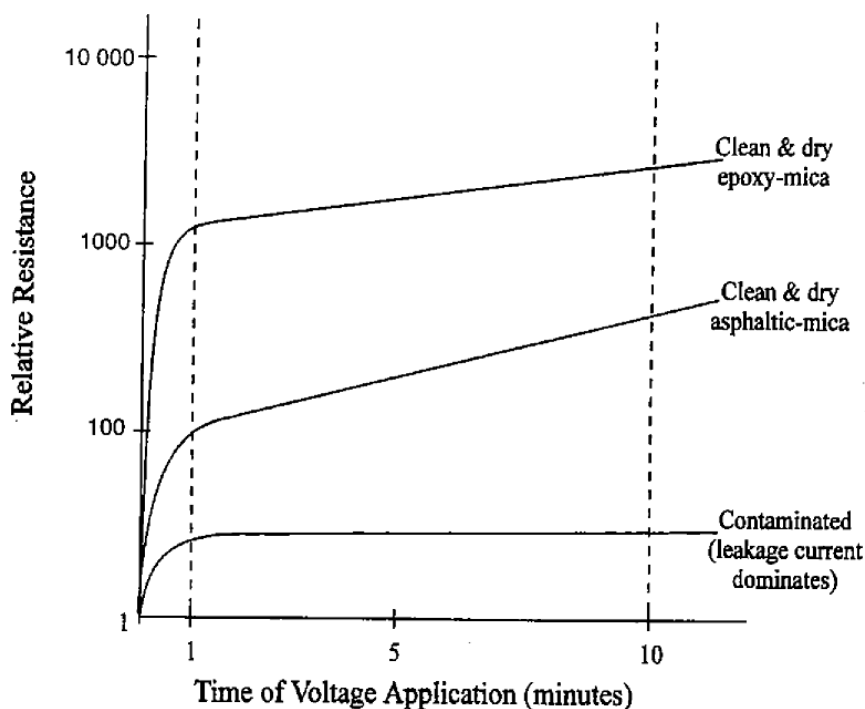


Figura 3.4: Curvas características das medidas da resistência de isolamento para três tipos de máquinas diferentes [3]

### 3.1.3.5 Corrente de descarga

Após a medida, e portanto quando se retira a tensão, deve-se providenciar a descarga do circuito. As correntes de descarga manifestam-se de duas formas:

- Uma corrente de descarga com componente capacitiva com caimento quase instantâneo, dependendo da resistência do circuito de descarga.
- Uma corrente de descarga absorvida, com caimento desde um valor inicial elevado até quase zero, com a mesma característica da corrente inicial de carga mas com polaridade inversa. Este decréscimo pode demorar mais do que 30 min dependendo do tipo de isolamento, do tipo e dimensão da máquina.

## 3.1.4 Factores que afectam a resistência de isolamento

### 3.1.4.1 Efeito das condições da superfície do enrolamento

A corrente de fugas superficial ( $I_L$ ) depende do depósito na bobinagem de materiais contaminadores como óleo ou pó de carvão, na parte de fora da ranhura.

Esta corrente é maior nas grandes máquinas particularmente no rotor com grandes superfícies expostas e sujeitas a estes depósitos de materiais.

Poeiras (ou sal) instaladas nas superfícies isolantes, que normalmente são maus condutores quando secos, podem contudo tornar-se parcialmente condutores quando expostos a humidade, óleo e assim baixar o valor da resistência de isolamento.

Se a resistência de isolamento ou índice de polarização são reduzidos por contaminação, podem ser de novo repostos a níveis aceitáveis por acção de limpeza e secagem.

#### 3.1.4.2 Efeito de Humidade

Independentemente do grau de limpeza da superfície da bobinagem, se a temperatura da bobinagem estiver mais baixa do que a temperatura de orvalho do ar ambiente, pode-se formar uma película de humidade na superfície do isolamento que podem baixar o valor da resistência de isolamento e índice de polarização. O efeito pode ser mais pronunciado se a superfície estiver contaminada ou o isolamento apresentar fissuras.

Note-se que o efeito da contaminação por humidade em bobinagens em bom estado não são impedimento da obtenção de leituras aceitáveis.

Alguns tipos de isolamentos de bobinas mais antigos são higroscópicos (absorvem água com facilidade) e a humidade pode então ser conduzida para o interior do isolamento. Isto verifica-se particularmente nos antigos isolamentos asfalto-mica e mica folium, assim como em algumas fitas utilizadas entre barras não isoladas nos rotores das grandes máquinas. A humidade absorvida aumenta a corrente de condução ( $I_G$ ) e reduz significativamente a resistência de isolamento.

Em máquinas em serviço é habitualmente a uma temperatura acima do ponto de orvalho.

Quando se realizam os ensaios e medidas em máquinas que estiveram em serviço, as medidas devem ser registadas antes que a temperatura do enrolamento da máquina baixe para valores inferiores ao ponto de orvalho.

Máquinas fora de serviço (sem aquecimento ambiente) são frequentemente ensaiadas com a temperatura da bobinagem abaixo do ponto de orvalho e portanto podem apresentar valores da resistência de isolamento e índice de polarização mais baixos do que os esperados, devido à contaminação por humidade. Pode ser necessário secar a bobinagem por forma serem obtidos valores aceitáveis antes de colocar novamente as máquinas em serviço ou realizar ensaios de alta tensão.

É recomendado que uma máquina com baixo índice de polarização e medidas de resistência de isolamento após 1 min também baixas, que não seja submetida a mais ensaios de alta tensão.

#### 3.1.4.3 Efeito da Temperatura

**Teoria geral** - O valor da resistência de isolamento para um determinado sistema, em qualquer tempo, varia exponencialmente e inversamente com a temperatura da bobinagem. Existe um contraste entre a dependência da temperatura na resistividade nos materiais metálicos e não metálicos particularmente em bons isolamentos. Nos metais, onde existem inúmeros electrões livres, temperaturas elevadas introduzem enorme agitação térmica, reduzindo o caminho livre para os electrões

e consequentemente a redução da mobilidade dos electrões e um aumento da resistividade. No entanto, nos isolamentos, um aumento de temperatura fornece energia térmica que liberta portadores de energia adicionais e assim reduzindo a resistividade.

Estas variações de temperatura afectam todas as componentes da corrente total (directa) identificadas anteriormente excepto a corrente geométrica de capacitância ( $I_C$ ).

O valor da resistência de isolamento de uma bobinagem depende da temperatura da própria bobinagem e do tempo decorrido desde o início da aplicação de tensão. A inércia térmica da máquina que é ensaiada é tão grande que o diferencial de temperatura entre as leituras da resistência de isolamento de 1 e 10 min é desprezável, excepto para medidas obtidas durante um processo de secagem à corrente nominal. Por forma a evitar o efeito da temperatura na análise de resultados, os testes subsequentes devem ser realizados quando a bobinagem estiver sensivelmente à mesma temperatura do ensaio anterior.

No entanto se a temperatura da bobinagem não puder ser controlada de um teste para outro, é recomendável que todos os valores medidos da resistência de isolamento sejam corrigidos para a mesma temperatura de 40 °C pela equação:

$$R_C = K_T R_T \quad (3.2)$$

Onde:

$R_C$  é a resistência de isolamento (em  $M\Omega$ ) corrigida para 40 °C

$K_T$  é o coeficiente de temperatura da resistência de isolamento a uma temperatura T em °C

$R_T$  é a resistência medida (em  $M\Omega$ ) a uma temperatura T em °C

Apesar do valor correcto ser uma aproximação, isto permite uma melhor comparação dos valores da resistência de isolamento obtidos a diferentes temperaturas.

Para temperaturas de enrolamentos abaixo do ponto de orvalho, é difícil prever o efeito da condensação de humidade na superfície, por esse motivo uma tentativa de correcção para 40 °C para análise estatística iria introduzir erros inaceitáveis na medida. Nestes casos, é recomendado que o historial dos ensaios à máquina em condições semelhantes seja o factor determinante na decisão de voltar a colocar a máquina em serviço.

No entanto uma vez que a contaminação por humidade normalmente faz baixar o valor da medida da resistência de isolamento e/ou o índice de polarização é possível a correcção para 40 °C para comparar com os critérios de aceitação que indicaremos.

Não existe uma forma eficaz de converter uma medida da resistência de isolamento sob condições específicas de humidade, para um valor de resistência de isolamento que ocorreria a outra

diferente condição de humidade.

**Medidas para determinar  $K_T$**  - O método recomendado para obtenção de valores para traçar as curvas da resistência de isolamento vs. temperatura do enrolamento é o de efectuar medidas a várias temperaturas do enrolamento, todas acima da temperatura de orvalho, e depois apresentar os gráficos numa escala semi logarítmica. Quando é utilizada uma escala logarítmica para a resistência de isolamento uma escala linear para a temperatura, os pontos de ensaio aproximam-se a uma recta que pode ser extrapolada para obtenção do valor corrigido para 40 °C.

**Determinação de  $K_T$  por aproximação** - Se o efeito da temperatura no sistema de isolamento a ensaiar é desconhecido, pode ser obtido um valor aproximado para o coeficiente  $K_T$  utilizando a curva da Figura 3.5 para redução de  $\frac{1}{2}$  do valor da resistência por cada 10 °C de incremento na temperatura.

Note-se que isto é apenas uma aproximação e não deverá ser utilizado para cálculo da resistência de isolamento para diferenciais de temperatura distantes de 40 °C, pois dessa forma podem resultar erros significativos.

Nota – a redução da resistência para metade por cada aumento de 10 °C na temperatura, é baseada no teste de alguns sistemas de isolamento dos fins dos anos 50, o que pode não ser verdade para todos os sistemas de isolamento. Estudos mais recentes indicaram um factor de correcção para a redução da resistência para metade para temperaturas no intervalo de 5 a 20°C. Uma variação do factor  $K_T$  pode levar a erros significativos em  $R_C$ , amplificados pela diferença de temperatura do enrolamento e os 40 °C.

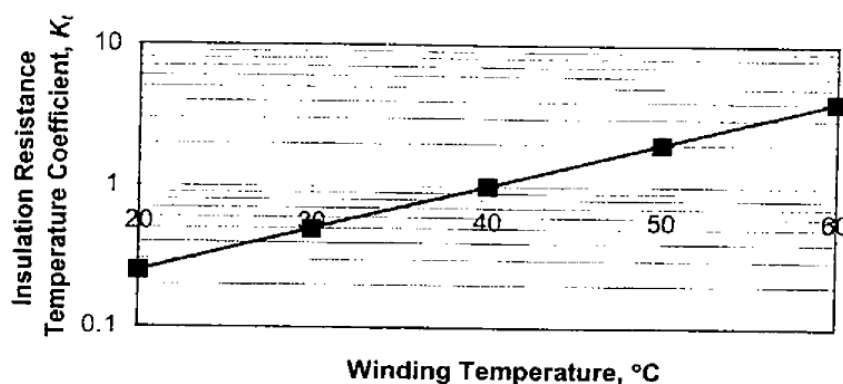


Figura 3.5: Determinação aproximada do valor do coeficiente da resistência de isolamento,  $K_T$ , para incrementos de 10 °C de temperatura. [4]

$K_T$  pode ainda ser aproximado, para cada redução de  $\frac{1}{2}$  do valor da resistência por cada 10 °C de incremento na temperatura, pela aplicação da expressão seguinte:

$$K_T = (0,5)^{(40-T)/10} \quad (3.3)$$

Ou por exemplo se a temperatura do enrolamento durante o ensaio foi de 35 °C, e o comportamento do isolamento foi tal que a resistência veio reduzida em  $\frac{1}{2}$  do valor por cada 10 °C de incremento na temperatura, então o factor  $K_T$  corrigido para 40 °C pode ser determinado pela expressão:

$$K_T = (0,5)^{(40-35)/10} = (0,5)^{(5)/10} = (0,5)^{1/2} = 0,707 \quad (3.4)$$

**Correcção do Índice de Polarização -** Quando o índice de polarização é utilizado juntamente com a resistência de isolamento para determinar a condições do isolamento, não é necessário fazer uma correcção de temperatura ao I.P., já que a temperatura da máquina não se altera apreciavelmente entre as leituras efectuadas entre 1 min e 10 min., o efeito da temperatura no índice de polarização é habitualmente pequeno.

No entanto, quando a temperatura inicial do enrolamento é elevada, uma redução da temperatura no sistema de isolamento durante a realização dos ensaios pode resultar num substancial aumento da resistência de isolamento observada entre 1 min e 10 min devido ao efeito da temperatura. Neste caso o índice de polarização pode ter um valor invulgarmente alto, o que a verificar-se recomenda-se a repetição da medida a uma temperatura igual ou inferior a 40 °C para verificação do I.P.

Conforme referido anteriormente, se qualquer uma das medidas 1 min ou 10 min são registadas quando a temperatura do enrolamento é inferior à temperatura de orvalho, os efeitos de contaminação por humidade têm de ser considerados na análise dos resultados.

### 3.1.5 Efeito do nível de tensão utilizado no ensaio

O principio para os considerandos sobre tensões foram apresentados na Tabela 3.1 da página 42.

O valor da resistência de isolamento pode decrescer com o aumento da tensão aplicada, no entanto para isolamentos em boas condições e um razoável estado seco e descontaminado, dever-se-á encontrar o mesmo valor da resistência de isolamento para tensões até ao valor de pico da tensão nominal da máquina.

Um decréscimo significativo no valor da resistência de isolamento com o aumento da tensão aplicada pode ser um indicador de problemas no sistema de isolamento. Estes problemas podem ser devidos a defeitos (imperfeições) no sistema de isolamento ou quebras de isolamento, agravados pela presença de sujidade ou humidade; ou os problemas podem ser devidos ao efeito da

humidade e/ou sujidade por si só ou resultado de qualquer outro fenómeno de deterioração. A alteração na resistência de isolamento é mais pronunciada a níveis de tensão consideravelmente superiores à tensão nominal.

### **3.1.6 Efeito de carga existente no enrolamento durante a medida de isolamento**

No caso de existir carga residual no enrolamento, o valor medido da resistência de isolamento será errado. Por esse motivo, antes da medida da resistência de isolamento, as bobinas devem ser completamente descarregadas. Permanecerá uma carga residual de deflecção proveniente da ligação do equipamento de medida da resistência de isolamento, mas antes da aplicação de tensão. Qualquer deflecção inversa será desprezável.

Após a aplicação da alta tensão directa, é fundamental ligar a bobinagem à terra por razões de segurança bem como de precisão das subseqüentes medidas ou ensaios. O tempo de ligação à terra deverá ser no mínimo quatro vezes o tempo de carga.

### **3.1.7 Condições de medida da resistência de isolamento**

Deve registar-se a temperatura ambiente, humidade relativa, ponto de orvalho, temperatura do enrolamento, tempo em que a máquina está fora de serviço, tensão de ensaio, tipo de ligações efectuadas na altura da realização dos ensaios.

É ainda importante converter as médias para a base de 40 °C para análise futura.

Não é necessário que a máquina esteja em regime estacionário para a realização da medida da resistência de isolamento. Muitas vezes é desejável que esta medida seja feita enquanto o enrolamento é sujeito a forças centrífugas semelhantes às que ocorrem durante o funcionamento normal da máquina.

Em certos casos é prático fazer vários ensaios periódicos de medida da resistência de isolamento enquanto as máquinas rodam em curto circuito para secagem. Sempre que a máquina não está em regime estacionário durante a medida da resistência de isolamento, deve tomar-se precauções para evitar danos no equipamento e acidentes pessoais.

### **3.1.8 Ligações da bobinagem para a realização da medida da resistência de isolamento**

É recomendável sempre que possível que cada fase seja isolada e ensaiada separadamente. Ensaios separados de cada fase permite comparar os resultados obtidos. Quando uma fase está a ser testada, as outras duas fases devem ser ligadas à mesma terra do núcleo do estator ou corpo do rotor.

Quando se ensaiam todas as fases em simultâneo, apenas é ensaiado o isolamento à massa e não é efectuado qualquer ensaio de medida de isolamento fase-fase. O ensaio de isolamento fase-fase é apenas verificado quando uma fase é colocada em tensão e as outras são ligadas à terra.

As pinças, escovas de montagem, cabos, interruptores, condensadores, descarregadores de sobretensões, transformadores de tensão e outro equipamento externo podem influenciar a leitura da resistência. É recomendável que a medida da resistência de isolamento sejam efectuadas por equipamento externo ligado à terra.

Em qualquer caso, deve ser usada uma terra única para evitar qualquer indesejado efeito no resultado do ensaio devido perdas originadas no circuito de terra.

### 3.1.9 Métodos para medida da resistência de isolamento

#### 3.1.9.1 Medida directa

Uma medida directa da resistência de isolamento pode ser efectuada com o seguinte equipamento:

- Medida directa com recurso a megaohmímetro auto alimentado ou alimentado por gerador.
- Medida directa com recurso a megaohmímetro com bateria própria. Nota: será este o método utilizado para a medida no trabalho de campo
- Medida directa com recurso a megaohmímetro incorporando um rectificador e utilizando uma alimentação externa estabilizada.
- Ponte de resistências incluindo galvanómetro e baterias.

#### 3.1.9.2 Medida calculada

A resistência de isolamento pode ser calculada a partir de leituras de voltímetro e amperímetro utilizando uma fonte externa (mas bem regulada e portanto estável) de tensão directa (dc).

O método do voltímetro-amperímetro (micro amperímetro) é um método simples para determinar a resistência de isolamento através da medida da tensão aplicada ao isolamento e a corrente que o percorre. É requerida uma fonte constante e estabilizada de tensão dc e o voltímetro tem de ser escolhido tendo em conta a máxima e mínima tensão que pode ser utilizada.

O micro amperímetro tem de estar na escala mais elevada ou curto-circuitado durante os primeiros segundos de carga por forma a que não seja danificado pela corrente de carga capacitiva e a corrente inicial absorvida.

A resistência pode ser calculada pela equação:

$$I_{R(t)} = \frac{E(t)}{I(t)} \quad (3.5)$$

Onde:

$I_{R(t)}$  é a resistência de isolamento em  $M\Omega$

$E_{(t)}$  é a mediada da tensão em V

$I_{(t)}$  é a medida da corrente em micro ampere (t) segundos depois da aplicação da tensão de ensaio

### 3.1.9.3 Interpretação dos resultados da medida da resistência de isolamento e índice de polarização

A medida da resistência de isolamento e o índice de polarização podem ser utilizados com os seguintes fins:

- O historial da medida da resistência de isolamento de uma determinada máquina, medida em condições uniformes no que diz respeito a variáveis controláveis, é reconhecido como útil para verificação da tendência e condições do isolamento ao longo dos anos.
- Estimativa da possibilidade da máquina poder ser submetida a ensaios de alta tensão ou a operação, por comparação de antigos e actuais valores de I.P. e/ou  $I_{R1}$ .

### 3.1.9.4 Monitorização do estado do isolamento

Se o historial dos valores da resistência de isolamento da máquina existe, então a comparação de valores actuais com esse histórico podem suportar decisões sobre o estado do isolamento. É no entanto importante comparar testes efectuados sob as mesmas condições, isto é, temperatura do enrolamento, nível de tensão, duração da tensão aplicada, humidade relativa. Para comparação de valores de testes efectuados a diferentes temperaturas do enrolamento, os valores devem ser corrigidos para a mesma temperatura.

Um caimento abrupto no  $I_{R1}$  ou no I.P. relativamente a valores anteriores, pode indicar contaminação superficial, humidade, ou falhas de isolamento graves como fendas. Quando aparece um valor baixo para o I.P. a temperaturas elevadas (acima dos 60 °C), é recomendado fazer uma segunda medida abaixo dos 40 °C, mas acima do ponto de orvalho, por forma a verificar o real estado do isolamento.

Para testes realizados nas mesmas condições, um crescimento constante no  $I_{R1}$ , isto é um decréscimo na corrente de absorção com o tempo, pode indicar uma decomposição do material impregnante, particularmente quando os materiais isolantes são do tipo termoplásticos (como asfalto-mica).

### 3.1.9.5 Adequado para operação ou continuar com ensaios

Quando o histórico dos valores da resistência de isolamento não é conhecido, são recomendados valores mínimos para o I.P e  $I_{R1}$  para estimar a adequabilidade da aplicação de alta tensão ao enrolamento, continuando-se os ensaios, ou para início de operação.

Se os valores de  $I_{R1}$  ou I.P são baixos devido à sujidade, excesso de humidade, podem ser melhorados para valores aceitáveis por meio de limpeza e secagem.



Durante o processo de secagem do isolamento, o índice I.P. pode ser utilizado para indicação de quando se pode terminar o processo de secagem. Isto é quando o I.P. excedeu o valor mínimo recomendado. Se o valor de  $I_{R1}$  é baixo devido a deterioração grave do isolamento ou danos, a entrada em serviço ou a realização de ensaios de alta tensão à máquina não são recomendados.

Máquinas com  $S=10$  MVA e menos devem ter ou o valor do índice de polarização ou o valor da resistência de isolamento (a 40 °C) acima dos valores mínimos recomendados, para poderem entrar em operação o ser sujeitas a ensaios de alta tensão.

Máquinas com  $S > 10$  MVA devem ter ambos o valor do índice de polarização e o valor da resistência de isolamento (a 40 °C) acima dos valores mínimos recomendados, para poderem entrar em operação o ser sujeitas a ensaios de alta tensão.

Se o valor de  $I_{R1}$  for maior do que 5000 MΩ, o índice de polarização pode ser ambíguo e nesse caso é desprezável.

Para isolamentos mais antigos como verniz cambric, mica-folium, asfalto, nas bobinagens, um valor elevado para o I.P. (p.ex maior do que 8) pode indicar que o isolamento está com envelhecimento térmico e portanto apresenta um elevado risco de falha de isolamento.

Se durante uma inspeção física (bater no isolamento por exemplo) confirmar-se que o isolamento está seco mas quebradiço, é recomendável não o limpar ou submeter o enrolamento e altas tensões. Pode ocorrer uma falha de isolamento a qualquer altura se a máquina for colocada em serviço.

Pode ser possível operar a máquina com valores de I.P. e  $I_{R1}$  abaixo dos valores mínimos recomendáveis, no entanto com base nesta norma tal não é aconselhado. Em todos os caso em que os valores medidos estão a baixo dos mínimos recomendados, devem ser encetadas averiguações e investigações para identificar as causas das medidas baixas.

O historial da bobinagem, inspeções visuais e outros resultados de ensaios devem ser utilizados para determinar se a máquina pode ser colocada em serviço ou não.

### 3.1.9.6 Limitações do ensaio da medida da resistência de isolamento

Os valores da resistência de isolamento são úteis na avaliação da eventual presença de alguns problemas de isolamento como contaminação, absorção de humidade, fendas evidentes; existindo no entanto algumas limitações:

- A resistência de isolamento de um enrolamento não está directamente relacionada com a sua rigidez dieléctrica. A não ser que o defeito seja concentrado, é impossível especificar o valor da resistência de isolamento em que garantidamente ocorre a falha de um sistema de isolamento do enrolamento.
- Enrolamentos com grandes áreas e superfícies expostas consideráveis, como os grandes alternadores hídricos que estamos a tratar que são máquinas grandes e de baixa velocidade, podem apresentar valores para a resistência de isolamento inferiores aos mínimos recomendados. Neste caso torna-se fundamental o acesso a dados históricos do  $I_{R1}$  para avaliação das condições do isolamento.
- Uma única medida da resistência de isolamento a uma determinada tensão, não nos indica se existe matéria contaminante concentrada ou distribuída pelo enrolamento.
- Medidas directas em tensão como sejam os ensaios para determinar  $I_R$  e I.P, podem não detectar vazios de isolamento causados por deficiente impregnação, deterioração térmica ou circulação térmica em bobinas com alteração de forma.
- Porque os ensaios para determinação da resistência de isolamento são conduzidos com a máquina em regime estacionário, estes testes não determinam problemas devidos à rotação das partes, tais como bobinas soltas, vibrações que podem originar movimento nos terminais do enrolamento.

### **3.1.10 Valores mínimos recomendados para a resistência de isolamento e índice de polarização**

#### **3.1.10.1 Valores mínimos**

Os valores mínimos recomendáveis para o I.P. e  $I_{R1}$  de um enrolamento de uma máquina AC ou DC rotativa são os valores mais baixos em relação aos quais é recomendado o ensaio de alta tensão ou para entrada em serviço.

Em alguns casos, materiais especiais usados no isolamento ou o projecto da máquina pode levar a encontrar valores mais baixos. Os valores mínimos de projecto devem ser comparados com o histórico dos valores medidos.

#### **3.1.10.2 Índice de Polarização (I.P.)**

Os valores mínimos recomendados para o I.P. para máquinas AC ou DC rotativas estão listados na Tabela 3.2. Esta tabela é baseada na classe térmica dos materiais utilizados no isolamento e com a excepção de enrolamentos de campo não isolados, aplica-se a todos os materiais independentemente da sua aplicação.

Nota: Se o valor da resistência de isolamento a 1 min é superior a  $5\text{ G}\Omega$ , o I.P. calculado não tem qualquer significado. Nestes casos, o I.P. pode ser ignorado como medida de avaliação das condições do enrolamento.

Classe Térmica	I.P. Mínimo
Classe A	1.5
Classe B	2.0
Classe F	2.0
Classe H	2.0

Tabela 3.2: Valores mínimos recomendados para o índice de polarização (I.P.) para todos os componentes da máquina de acordo com as classes de isolamento. [5]

**Aplicabilidade do Índice de Polarização nas bobinas de campo do rotor -** O objectivo dos ensaios para determinar o índice de polarização e resistência de isolamento é o de avaliar se um determinado enrolamento está em boa condição para entrar em serviço ou ser submetido a um ensaio de alta tensão. A bobinagem de alguns tipos de rotor são frequentemente não isoladas do corpo do rotor; portanto o índice de polarização não pode ser obtido neste tipo de bobinagem. Se, no entanto, as bobinas do rotor são isoladas do corpo do rotor, como por exemplo nas máquinas de polos salientes, o ensaio para determinação do índice de polarização é aplicável.

As bobinas de campo de muitos grandes geradores são constituídas por barramento de cobre exposto (não isolado) i.e. não encapsulado em isolamento. Embora isolados da massa e de outros componentes por intermédio de bandas isolantes, a imensa área de cobre não isolado não apresenta corrente de absorção ( $I_A$ ) significativa por comparação com a corrente de fugas ( $I_L$ ), quando submetida a uma tensão directa de ensaio. A falta de corrente absorvida altera a curva característica de  $I_R$  de forma a que não existe grande diferença entre os valores medidos de  $I_R$  aos 1 min e 10 min. Portanto, o I.P., que descreve a inclinação da curva  $I_R$ , não é aplicável a bobinas de campo não isoladas.

Por outro lado, outros tipos de bobinas de campo, não têm quantidades apreciáveis de condutores expostos. Este tipo de projecto utiliza condutores encapsulados em isolamento e portanto têm características de corrente absorvida ( $I_A$ ). Para estas máquinas, o I.P. pode ser determinado e desta forma pode-se aferir as condições do sistema de isolamento. O valor mínimo recomendado, baseado na classe térmica de isolamento da bobinagem de campo, deve ser utilizado como referência.

**Aplicabilidade do Índice de Polarização quando  $I_{R1}$  é maior do que 5000 MΩ -** Quando a resistência de isolamento obtida após a aplicação da tensão durante 1 min. ( $I_{R1}$ ) é maior do que 5000 MΩ, baseado no nível de tensão aplicada, a corrente total medida ( $I_T$ ) pode estar na grandeza dos sub microampere. A este nível de corrente é necessária instrumentação de medida mais sensível e além disso pequenas alterações no nível de tensão, humidade ambiente, ligações das sondas de ensaio podem afectar grandemente o valor das medidas da corrente total no intervalo 1-10 min, necessários para determinação do I.P. Por este motivo, quando  $I_{R1}$  é maior do que 5000

MΩ, o I.P. pode ser ou não um bom indicador do estado do sistema de isolamento e portanto não é recomendado como medida de avaliação.

### 3.1.10.3 Resistência de Isolamento

O valor mínimo da resistência de isolamento após 1 min.  $I_{R1min}$ , para decisão se a máquina está em boas condições de ser submetida ao ensaio de alta tensão ou pronta para entrar em serviço, encontra-se na Tabela 3.3.

O valor da resistência de isolamento que se pretende comparar com o valor mínimo da tabela ( $I_{R1min}$ ), é o valor da resistência medido mas corrigido para 40 °C após a aplicação da tensão de ensaio a todo o enrolamento durante 1 min.

O valor mínimo da resistência de isolamento de uma fase de uma máquina trifásica, com as outras duas fases ligadas à terra, deve ser aproximadamente duas vezes o valor medido para todo o enrolamento. Se cada fase é testada separadamente e é utilizado um circuito de isolamento das outras duas fases que não estão a ser ensaiadas, o valor da resistência de isolamento obtida será próxima de três vezes o valor do enrolamento completo.

Valor mínimo da resistência de isolamento	Natureza do sistema de isolamento
$I_{R1min} = kV + 1$	Para a maior parte dos enrolamentos produzidos antes de 1970, todos os enrolamentos de campo e outros não incluídos na tabela
$I_{R1min} = 100$	Para a maior parte das armaduras DC e bobinagens AC construídas depois de 1970
$I_{R1min} = 5$	Para a maior parte das máquinas com bobinagem do estator pré-formadas e tensões nominais inferiores a 1kV.

Tabela 3.3: Valor mínimo recomendado para a resistência de isolamento a 40 °C (valores em MΩ). [6]

Notas:

- $I_{R1min}$  é o valor mínimo recomendado para a resistência de isolamento, em megaohm, a 40 °C, e do enrolamento total da máquina.
- kV é a tensão nominal composta da máquina, valor eficaz em kV.

### 3.1.11 Ensaio utilizando tensão DC ou AC

A medida da resistência e isolamento com recurso a tensão DC é efectuada, aplicando a fonte tensão entre o enrolamento e a massa, utilizando um amperímetro para medir a corrente total que

a atravessa. O quociente entre a tensão de ensaio e a corrente medida, traduz o valor da resistência entre o enrolamento e a massa. A resistência é determinada por:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (3.6)$$

Onde:

$\rho$  - resistividade do material

R – resistência

L – comprimento do circuito

S – secção do enrolamento

Uma vez que a resistividade da sujidade, óleo e água que habitualmente são os elementos contaminantes dos enrolamentos nas máquinas rotativas, é baixa o ensaio com tensão DC de enrolamentos contaminados normalmente resulta numa elevada corrente de fugas superficiais e consequentemente uma leitura de resistência baixa. Esta propriedade faz da aplicação de tensão DC um método viável para determinar o grau de contaminação do sistema de isolamento.

Se o sistema de isolamento utiliza enfitamentos em algodão com mica como isolamento eléctrico primário do sistema, a aplicação e tensão DC pode revelar se o algodão absorveu humidade e por isso apresenta baixa resistividade. Note-se que a maior parte das bobinagens posteriores a 1970 não são constituídas por estes elementos higroscópicos, e portanto a aplicação no ensaio de tensão DC não detectará problemas internos no sistema de isolamento como deterioração térmica.

Uma vez que o isolamento eléctrico primário utilizado nas bobinas pré-fabricadas é mica, e a mica tem virtualmente resistividade infinita (bom isolante), apenas uma camada de fita com base em mica impede a existência de corrente directa. Portanto a existir uma fuga no isolamento devido a impregnação deficiente, deterioração térmica ou variação térmica, um ensaio em DC não a detectaria. No entanto a existir uma falha grave no isolamento ao longo de toda a camada, é possível que exista condução eléctrica entre o cobre e a massa, aparecendo assim uma medida de baixa resistência.

Quando se utiliza uma elevada corrente AC entre os terminais do enrolamento e a massa, a capacitância do circuito domina a na composição da corrente. Essa capacidade é determinada por:

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (3.7)$$

Onde:

C – capacitância  $\epsilon$  – permissividade dieléctrica do material

S – secção da bobina

d – espessura do material

Uma vez que a permissividade dieléctrica de um sistema de isolamento é fortemente afectada pela presença de falhas de isolamento e/ou água, o ensaio com recurso a tensão AC é mais sensível do que o mesmo ensaio com recurso a tensão DC no que diz respeito a detecção de problemas internos no sistema de isolamento. Devido às diferentes potencialidades dos dois tipos de tensão, recomenda-se que o ensaio seja efectuado com ambos os tipos para melhor averiguar o estado do sistema de isolamento.

### 3.2 Norma IEC 60034-1, 9.2

A norma IEC 60034-1, 9.2 define os pressupostos a ter em consideração no ensaio de alta tensão dos enrolamentos e/ou suas partes da máquina.

O ensaio agora descrito será aplicado entre os enrolamentos sob teste e a carcaça da máquina, com o núcleo e as bobinas que não estão a ser ensaiadas ligadas electricamente à carcaça. Este ensaio é aplicado apenas a máquinas novas e completas, com todas as suas partes em estado de funcionamento normal, e será realizado nas instalações do fabricante ou após a instalação na obra.

Na eventualidade de se ter executado um ensaio térmico, o teste de alta tensão deve ser efectuado imediatamente depois desse ensaio térmico.

No caso de máquinas polifásicas (com as objecto deste estudo) com tensões nominais iguais ou superiores a 1 KV em que existe acesso a ambos os extremos de cada fase, a tensão de ensaio será aplicada entre cada fase e a carcaça, com o núcleo e as outras fases e os enrolamentos que não estão a ser ensaiados ligados electricamente à carcaça.

Excepto nos casos mencionados abaixo, a tensão de ensaio deve ser de potência e frequência e uma forma de onda o mais próximo possível de uma sinusóide. O valor final da tensão de ensaio deve estar de acordo com a Tabela 3.4. No entanto para máquinas com tensão nominal igual ou superior a 6 kV, quando não está disponível o equipamento para injeção de potência e frequência então, por acordo, é possível executar este ensaio em DC com uma tensão 1,7 vezes superior ao valor eficaz da Tabela 3.4.

Nota: é assumido que durante os ensaios em DC, a distribuição superficial de potencial ao longo do isolamento da bobinagem de fecho do enrolamento e o mecanismo de envelhecimento, são diferentes dos ocorridos durante o mesmo ensaio mas em AC.

O ensaio deverá começar com uma tensão inferior a metade da tensão total final prevista para o ensaio. A tensão deverá ser progressivamente aumentada até ao valor final, por patamares não superiores a 5% do valor final. O tempo de elevação da tensão de metade até ao valor da tensão

final não deve ser inferior a 10 s. A tensão de ensaio final deve ser mantida durante 1 min de acordo com o valor especificado na Tabela 3.4. Não deve existir qualquer falha durante este período

Para máquinas novas, as bobinagens serão testadas com a tensão final.

Quando é acordada a realização do ensaio de alta tensão a enrolamentos que foram parcialmente bobinados ou no caso de uma beneficiação geral dos enrolamentos de uma máquina, deve ser seguido o seguinte procedimento:

- Rebobinagens parciais são ensaiadas com um valor de tensão 75% do valor a considerar para uma máquina nova. Antes de executar o ensaio, a parte antiga da bobinagem deve ser cuidadosamente limpa e seca
- Rebobinagens ou beneficiações gerais, após limpeza e secagem, são ensaiadas com um nível de tensão igual a 1,5 vezes a tensão nominal da máquina, com um mínimo de 1000 V se a tensão nominal for igual ou superior a 100 V e um mínimo de 500 V se a tensão nominal for inferior a 100 V.

Item	Machine or part	Test voltage (r.m.s.)
1	Insulated windings of rotating machines of rated output less than 1 kW (or kVA) and of rated voltage less than 100 V with the exception of those in items 4 to 8	500 V + twice the rated voltage
2	Insulated windings of rotating machines of rated output less than 10 000 kW (or kVA) with the exception of those in item 1 and items 4 to 8 <sup>b</sup>	1 000 V + twice the rated voltage with a minimum of 1 500 V <sup>a</sup>
3	Insulated windings of rotating machines of rated output 10 000 kW (or kVA) or more with the exception of those in items 4 to 8 <sup>b</sup>  Rated voltage <sup>a</sup> : - up to and including 24 000 V - above 24 000 V	1 000 V + twice the rated voltage  Subject to agreement
4	Separately excited field windings of d.c. machines	1 000 V + twice the maximum rated circuit voltage with a minimum of 1 500 V
5	Field windings of synchronous generators, synchronous motors and synchronous condensers.	
5a)	Rated field voltage: - up to, and including 500 V,  - above 500 V.	Ten times the rated field voltage with a minimum of 1 500 V  4 000 V + twice the rated field voltage

Tabela 3.4: Ensaio de Alta Tensão. [7]

Item	Machine or part	Test voltage (r.m.s.)
5b)	When a machine is intended to be started with the field winding short-circuited or connected across a resistance of value less than ten times the resistance of the winding	Ten times the rated field voltage with a minimum of 1 500 V and a maximum of 3 500 V.
5c)	When the machine is intended to be started either with the field winding connected across a resistance of value equal to, or more than, ten times the resistance of the winding, or with the field windings on open circuit with or without a field-dividing switch	1 000 V + twice the maximum value of the r.m.s. voltage, which can occur under the specified starting conditions, between the terminals of the field winding, or in the case of a sectionalized field winding between the terminals of any section, with a minimum of 1 500 V <sup>c</sup>
6	Secondary (usually rotor) windings of induction motors or synchronous induction motors if not permanently short-circuited (e.g. if intended for rheostatic starting)	
6a)	For non-reversing motors or motors reversible from standstill only	1 000 V + twice the open-circuit standstill voltage as measured between slip-rings or secondary terminals with rated voltage applied to the primary windings
6b)	For motors to be reversed or braked by reversing the primary supply while the motor is running	1 000 V + four times the open-circuit standstill secondary voltage as defined in item 6a)
7	Exciters (except as below)	As for the windings to which they are connected
	<i>Exception 1:</i> exciters of synchronous motors (including synchronous induction motors) if connected to earth or disconnected from the field windings during starting	1 000 V + twice the rated exciter voltage, with a minimum of 1 500 V
	<i>Exception 2:</i> separately excited field windings of exciters (see item 4)	
8	Electrically interconnected machines and apparatus	A repetition of the tests in items 1 to 7 above should be avoided if possible, but if a test is performed on a group of machines and apparatus, each having previously passed its withstand voltage test, the test voltage to be applied to such an electrically connected arrangement shall be 80 % of the lowest test voltage appropriate for any individual piece of the arrangement <sup>d</sup>
9	Devices that are in physical contact with windings, for example, temperature detectors, shall be tested to the machine frame.  During the withstand test on the machine, all devices in physical contact with the winding shall be connected to the machine frame.	1 500 V
<p>a For two-phase windings having one terminal in common, the voltage in the formula shall be the highest r.m.s. voltage arising between any two terminals during operation.</p> <p>b Withstand tests on machines having graded insulation should be the subject of agreement.</p> <p>c The voltage occurring between the terminals of the field windings, or sections thereof, under the specified starting conditions, may be measured at any convenient reduced supply voltage, and the voltage so measured shall be increased in the ratio of the specified starting supply voltage to the test supply voltage.</p> <p>d For windings of one or more machines connected together electrically, the voltage to be considered is the maximum voltage that occurs in relation to earth.</p>		

Tabela 3.5: Ensaios de Alta Tensão (continuação). [7]

### 3.3 Norma IEC 60034-4, 6.3

A norma IEC 60034-4, 6.3 define os pressupostos a ter em consideração na medida de resistência dos enrolamentos e/ou suas partes da máquina.



Qualquer fonte de tensão DC (bateria, gerador, etc.) com nível de tensão de saída adequada e estabilizada, pode ser usada para medida da resistência de um enrolamento pelo método do voltímetro e amperímetro (recomendado) ou pelo método da ponte.

A resistência deve ser medida da forma directa nos terminais do enrolamento com o rotor parado. O método da ponte simples não é admissível para medida de resistências de valor inferior a  $1\Omega$ .

A medida da resistência do enrolamento da armadura (no nosso caso o estator), deve ser medido em cada fase e em separado. Se por alguma razão não se puder medir a resistência de forma directa, a medida deve ser feita entre cada par de terminais do enrolamento da armadura. Quando se mede em DC a resistência do enrolamento da armadura ou da excitação por:

- Método da ponte, é necessário pelo menos fazer três leituras, perturbando de cada vez o equilíbrio da ponte. A resistência deve ser medida nos anéis das escovas ou nos terminais do enrolamento por forma a evitar incluir na medida a resistência das escovas e dos seus contactos.
- Método do voltímetro e amperímetro, é recomendado verificar três a cinco vezes as leituras a vários valores estáveis de corrente.

O valor da corrente durante a medida da resistência utilizando DC deve ser tal que o aumento de temperatura do enrolamento durante o ensaio não é superior a 1 K, assumindo um aquecimento de forma adiabática. Para cálculo do aquecimento adiabático deve utilizar-se a seguinte fórmula:

$$\Delta\theta = \frac{j^2}{C} \quad (3.8)$$

Onde:

$j$  – é a densidade de corrente durante o ensaio em ampere por  $\text{mm}^2$ .

$C$  – constante igual a 200 para cobre e 86 para alumínio

Se o aquecimento do enrolamento é desconhecido, a corrente não deve ser superior a 0,1 da corrente nominal e não deve ser aplicada mais do que 1 min.

O tempo de medida deve ser tal que no instante em que se efectua a leitura, a leitura no equipamento de medida deve estar estável, i.e. os fenómenos transitórios já terão desaparecido tanto nos instrumentos de medida como nos circuitos onde estamos a medir o valor da resistência.

A temperatura durante a medida deve ser obtida por intermédio de um sensor de temperatura já instalado.

Termómetros e termopares utilizados para medir a temperatura do enrolamento, têm de ter sido instalados pelo menos por 15 min em avanço e devem estar protegidos de qualquer influência externa.

O número de identificação dos equipamentos de medida deve ser registado, por forma a utilizar os mesmos equipamentos nos ensaios subsequentes.

### 3.4 Conclusões

As normas apresentadas neste capítulo referem-se aos ensaios dieléctricos da máquina.

Entendem-se como os requisitos mínimos a seguir na prossecução dos ensaios de recepção, por isso nada impede que o fornecedor dos equipamentos majore os requisitos das normas evidenciando uma diferenciação no produto final.

Importa contudo referir que as solicitações repetitivas do isolamento por meio da execução sistemática deste tipo de ensaios podem conduzir a um envelhecimento precoce do mesmo. Por este motivo importa sopesar as decisões de solicitações do isolamento para além do estipulado nas normas, repetição de ensaios, abandono dos ensaios e início das medidas correctivas.

Apesar de na execução do preconizado nas normas poderem ser utilizados diferentes métodos para a obtenção dos resultados, procura-se sempre privilegiar as medidas directas às medidas indirectas por meio de montagens equivalentes como é o exemplo da medida da resistência de isolamento utilizando uma ponte de resistências, galvanómetro e baterias.

No caso dos ensaios de alta tensão, as medidas de segurança prevalecem sobre a continuidade e/ou início do ensaio. Por este motivo antes da execução deste tipo de ensaio é anunciado dia e hora da sua realização, são instaladas medidas de protecção colectivas adequadas e verificado o uso de equipamento de protecção individual. O acesso é condicionado a pessoal qualificado independentemente de ser fornecedor, cliente ou entidade inspectora.

## Capítulo 4

# Ensaaios de recepção do Alternador-Motor

Neste capítulo referem-se os ensaios de recepção a realizar ao alternador-motor do G2 do escalão de jusante. De entre os diversos ensaios realizados podemos distinguir dois grandes grupos ambos com a assistência do cliente e/ou seu representante:

- Ensaaios durante a fase de montagem e/ou sua conclusão.
- Ensaaios de colocação em serviço.

Não referimos aqui os outros ensaios realizados em fábrica a componentes, materiais ou sub-sistemas, como barras, núcleos, veio, sondas de temperatura, etc.

Muito embora o primeiro grupo de ensaios se revele de extrema importância na despistagem de eventuais erros de montagem, onde se incluem, verificação de chumaceira, sistemas de refrigeração, frenagem e elevação do rotor, alinhamento do veio, ajuste do entreferro, etc.; o segundo grupo de ensaios traduz efectivamente os ensaios de recepção já que verificam as características finais do projecto assim como asseguram as garantias de desempenho acordadas com o cliente com o grupo completamente montado.

Será sobre este segundo conjunto de ensaios que recairá o meu estudo.

Apresenta-se agora a lista de ensaios de recepção a realizar assim como a respectiva norma aplicável:

### 4.1 Ensaaios dieléctricos - enrolamento do estator

- Medição da resistência segundo IEC 60034-4, 6.3.
- Resistência de isolamentos segundo IEEE 115, 3.1 e IEEE 43.
- Ensaio de tensão segundo IEC 60034-1, 9.2

## 4.2 Ensaio dieléctricos - enrolamento do rotor

- Medição da resistência segundo IEC 60034-4, 6.3
- Resistência de isolamentos segundo IEEE 115, 3.1 e IEEE 43.
- Ensaio de tensão segundo IEC 60034-1, 9.2

## 4.3 Comportamento da Chumaceira Guia

- Vibrações segundo ISO 7919-5 Zone A
- Marcha de Aquecimento da Chumaceira segundo P GEN QC3 5007DE.
- Verificação da protecção de Sobre-velocidade

## 4.4 Ensaio de curto-circuito antes da primeira sincronização

- Características de saturação de curto-circuito trifásico segundo IEC 60034-4, 6.5.
- Ensaio de curto-circuito bifásico segundo IEC 60034-4, 6.20.
- Curto-circuito com duas fases e neutro segundo IEC 60034-4, 6.12.

## 4.5 Ensaio em vazio antes da primeira sincronização

- Características de saturação em vazio segundo IEC 60034-4, 6.4.
- Simetria da tensão
- Sequência de fases segundo IEEE 115, 3.7.2.
- Forma da curva de tensão segundo IEC 60034-1, 9.11.
- Tensão no veio segundo IEEE 115, 3.6
- Vibrações segundo ISO 7919-5 Zone A
- Ruído segundo ISO 1680
- Controlo de sincronização, sequência de fases e condições para sincronizar

## **4.6 Ensaio em carga depois da sincronização**

- Características de  $\cos\phi$ , sobre excitação e sub excitação segundo IEC 60034-4, 6.8.
- Rejeição de carga
- Momento de inércia J segundo IEC 60034-4.71/2000.
- Ensaio de aquecimento segundo IEC 60034-1, 8.
- Potência consumida pelas bombas de água de refrigeração
- Vibrações segundo ISO 7919-5 Zone A
- Ruído segundo ISO 1680
- Ajuste da instrumentação

## **4.7 Determinação calorimétrica de perdas parciais para a determinação do rendimento**

- Excitação zero (mecânica) ensaio de aquecimento segundo IEC 60034-2.17.
- Ensaio de aquecimento em vazio segundo IEC 60034-2.17.
- Ensaio de aquecimento em curto-circuito segundo IEC 60034-2.17.
- Aquecimento da chumaceira segundo IEC 60034-2.17

## **4.8 Determinação de perdas parciais para a determinação do rendimento**

- Perdas de excitação.
- Perdas nos sistemas auxiliares.

## **4.9 Determinação de quantidades da máquina**

- Curto-circuito repentino segundo IEC 60034-4, 6.12.
- Ensaio de queda da corrente de campo segundo IEC 60034-6.25.
- Ensaio de velocidade de embalamento.

## **4.10 Gerador depois dos ensaios de colocação em serviço**

- Inspeção visual.
- Certificado de conformidade.

## **4.11 Conclusões**

Este capítulo tratou de listar o conjunto de ensaios, acordados entre cliente e fornecedor de equipamentos, a realizar antes da entrada em serviço experimental e industrial da instalação. Trata-se no fundo de um plano de inspeção e ensaios acordado como mínimo para assegurar que as máquinas estão em boas condições de operacionalidade e que as normas e regras da arte que regem este tipo de instalação de equipamentos foram observadas.

Estes ensaios vão sendo executados seguindo o programa de montagem e colocação em serviço que está directamente relacionado com o programa geral de trabalhos do empreendimento. Isto é, os ensaios destas máquinas vão sendo executados á medida que a máquina vai sendo montada e a sequência dos mesmos está relacionada com o grau de acabamento da montagem dos alternadores-motores e equipamento com eles relacionados como sejam por exemplo turbinas, sistemas de excitação, barramento à tensão de produção, etc.

Á data de fecho desta dissertação apenas foi possível executar alguns dos ensaios dieléctricos, já que a máquina ainda está na fase inicial da sua montagem. O estator está posicionado em relação ao eixo do grupo, o rotor está pronto mas localizado no átrio da central enquanto se procede á montagem da chumaceira combinada no veio do alternador.

No próximo capítulo trataremos em detalhe cada um dos ensaios, indicando o equipamento de medida a instalar, os resultados obtidos e o tratamento dos mesmos tendo em conta as normas aplicáveis.

## Capítulo 5

# Ensaaios do Alternador-Motor

Neste capítulo apresentam-se e comentam-se os resultados dos ensaios realizados

### 5.1 Medida da Resistência de Isolamento do Estator

Conforme o descrito em 2.1 e 3.1.1, a medida da resistência de isolamento foi obtida seguindo a norma IEEE 43-2000.

No sentido da despistagem de eventuais erros de montagem e prevenir posteriores medidas correctivas que necessariamente envolveriam mais meios humanos e técnicos são realizados dois ensaios intermédios de medida da resistência de isolamento do estator, ainda durante a fase de montagem do estator, a saber:

- Medida da Resistência de Isolamento das barras de fundo do estator.
- Medida da Resistência de Isolamento das barras de topo do estator.
- Medida da Resistência de Isolamento do enrolamento completo do estator.

Apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios realizados assim como o procedimento adoptado para os obter. O mesmo princípio será utilizado para o ensaio de alta tensão que mais à frente trataremos no capítulo [5.2](#).

Os ensaios foram realizados na presença dos representantes da empresa fiscalizadora e do cliente EDP.

#### 5.1.1 Medida da Resistência de Isolamento das barras de fundo do estator

Realizou-se o ensaio da medida da resistência de isolamento das barras de fundo (*bottom layer bars*) assim como o ensaio de alta tensão das mesmas.

O objectivo é o de despistar eventuais erros de montagem evitando as medidas correctivas e posterior desmontagem de barras de uma camada inferior.

Apenas foram ensaiadas as barras colocadas em obra nas três zonas de junção do estator. A saber barras das ranhuras (*slots*) 133-144, ranhuras 293 a 304 e ranhuras 453-464.

Características da Máquina:

$U_n = 6\text{kV}$

Classe de isolamento – F

Sistema de isolamento – VPI

Pré requisitos: Toda as sondas de temperatura PT100 (12 na carcaça e 18 no núcleo) foram ligadas ao circuito de terra da central para evitar que fenómenos de indução e/ou eventual fecho de correntes as danificassem. A carcaça, núcleo e todas as barras também foram ligadas à terra. Levantava-se a ligação à terra das barras a ensaiar.

A zona das barras a ensaiar foi isolada com papel NOMEX para evitar descargas parciais.

Vai utilizar-se tensão DC em vez de AC

$$U_{AC} = 2U_n + 1 \text{ (kV)} \quad (5.1)$$

$$U_{DC} = U_n \times 1,7 \times 50\% \text{ (kV)} = 6 \times 1,7 \times 50\% = 5,1\text{kV (DC)} \quad (5.2)$$

Equipamento de medida – Unilap

Tensão de medida = 5,1 kV DC

Temperatura Ambiente – 19,5 °C

Humidade do Ar – 71,4 %

Temperatura do enrolamento – obtido de forma indirecta por medida da resistência utilizando uma tabela de conversão de temperatura PT100 vs. Resistência em anexo.

Valor medido = 107  $\Omega$  correspondendo pela tabela a 18 °C



Tempo	Ligações		
	Ranhura 133 - 144	Ranhura 293 - 304	Ranhura 453 - 464
1min	33 GΩ	30,4 GΩ	30 GΩ
2 min	59 GΩ	54 GΩ	53,1 GΩ
3 min	81 GΩ	74 GΩ	71 GΩ
4 min	102 GΩ	94,5 GΩ	90 GΩ
5 min	119 GΩ	112 GΩ	108 GΩ
6 min	137 GΩ	128 GΩ	123 GΩ
7 min	152 GΩ	143 GΩ	137 GΩ
8 min	165 GΩ	159 GΩ	152 GΩ
9 min	188 GΩ	174 GΩ	162 GΩ
10 min	196 GΩ	189 GΩ	180 GΩ
I.P. = $R_{10}/R_1$	5,94	6,22	6,0

Tabela 5.1: Resultados das medidas da resistência de isolamento das barras de fundo do estator.

Dos resultados obtidos vamos corrigir os valores para a temperatura de 40 °C utilizando a equação 3.2 referida no parágrafo 3.1.4.3. Para o efeito vamos determinar  $K_T$  utilizando a expressão 3.3 vindo:

$$K_T = (0,5)^{(40-18)/10} = 0,218 \quad (5.3)$$

Assim obtemos as resistências para 40 °C seguintes:

Ranhura 133-144:

$$I_{R1}=7,18 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=42,66 \text{ G}\Omega$$

Ranhura 293-304:

$$I_{R1}=6,62 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=41,13 \text{ G}\Omega$$

Ranhura 453-464:

$$I_{R1}=6,53 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=39,17 \text{ G}\Omega$$

Com estes valores conseguimos calcular o I.P. utilizando a definição em 3.1.1.5 temos:

- Ranhura 133-144: I.P. = 5,93
- Ranhura 293-304: I.P. = 6,22
- Ranhura 453-464: I.P. = 6

Conclui-se que de acordo com os valores mínimos das Tabela 3.3, para a resistência de isolamento após 1 min ( $I_{R1}$ ) e Tabela 3.2 (classe F), para o I.P, os valores encontrados estão acima desses mínimos pelo que consideram-se os resultados obtidos muito satisfatórios o que demonstra uma montagem cuidada e verifica o projecto.



Figura 5.1: Medida de temperatura e humidade ambiente

### 5.1.2 Medida da Resistência de Isolamento das barras de topo do estator

Realizou-se o ensaio da medida da resistência de isolamento das barras de topo (*top layer bars*) assim como o ensaio de alta tensão das mesmas.

O objectivo é o de despistar eventuais erros de montagem evitando as medidas correctivas e posterior desmontagem de barras. Apenas foram ensaiadas as barras colocadas em obra nas 3 zonas de junção do estator. A saber barras das ranhuras (*slots*) 121-156, ranhuras 281 a 316 e ranhuras 441-476.

Características da Máquina:

$U_n = 6\text{kV}$

Classe de isolamento – F

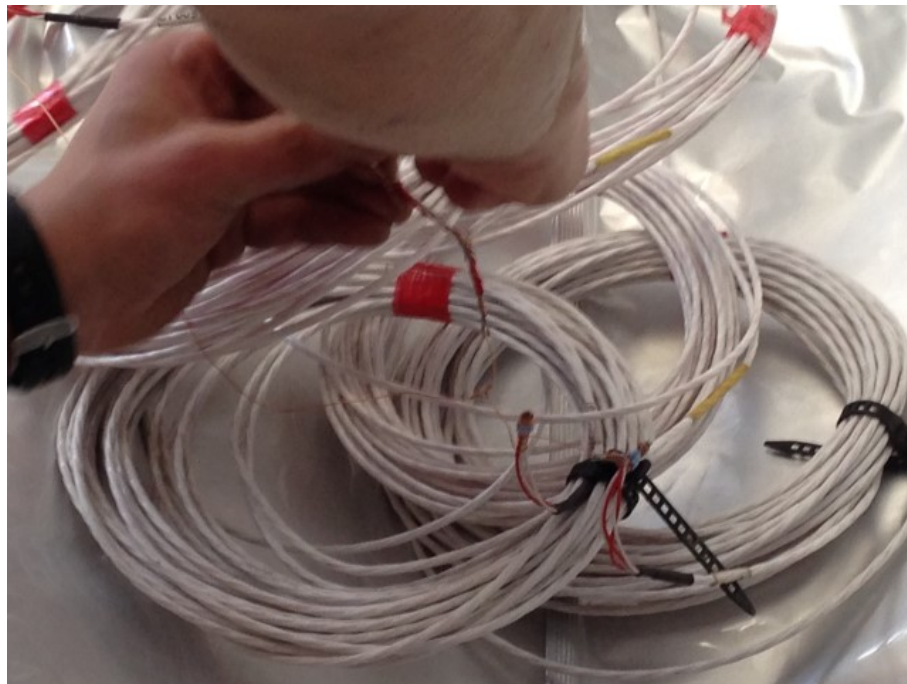


Figura 5.2: Ligação das RTD/PT100 entre elas e à terra

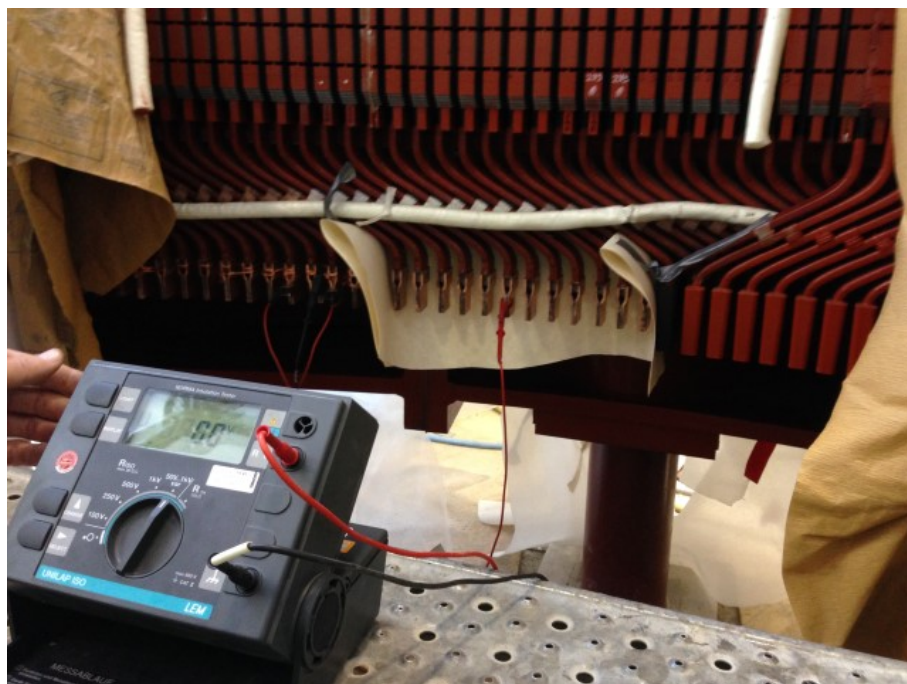


Figura 5.3: Medida da resistência de isolamento de 12 barras durante 1 min. Isoladas por NOMEX. As restantes estão ligadas à terra

Sistema de isolamento – VPI

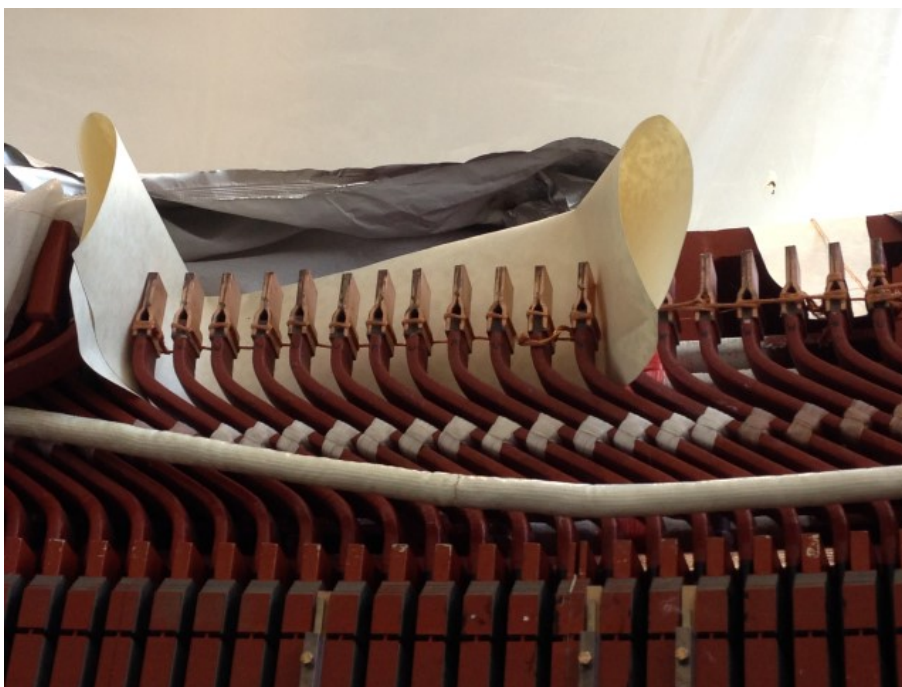


Figura 5.4: Detalhe da ligação superior das barras durante o ensaio. O topo das barras está isolado das restantes, mas as 12 barras estão ligadas electricamente entre si.

Pré requisitos: Toda as sondas de temperatura PT100 (12 na carcaça e 18 no núcleo) foram ligadas ao circuito de terra da central para evitar que fenómenos de indução e/ou eventual fecho de correntes as danificassem.

A carcaça, núcleo e todas as barras também foram ligadas à terra. Levantava-se a ligação à terra das barras a ensaiar.

A zona das barras a ensaiar foi isolada com papel NOMEX para evitar descargas parciais.

Verificou-se com o ohmímetro a não existência de passagem entre as barras de topo e as de fundo.

Vai utilizar-se tensão DC em vez de AC

$$U_{AC} = 2U_n + 1 \text{ (kV)} \quad (5.4)$$

$$U_{DC} = U_n \times 1,7 \times 50\% \text{ (kV)} = 6 \times 1,7 \times 50\% = 5,1 \text{ kV (DC)} \quad (5.5)$$

Equipamento de medida – Unilap

Tensão de medida = 5.1 kV DC

Temperatura Ambiente – 18,2 °C

Humidade do Ar – 58,4 %

Temperatura do enrolamento –17,2 °C

Tempo	Ligações		
	Ranhura 121-156	Ranhura 281-316	Ranhura 441-476
1min	6,4 GΩ	6,5 GΩ	6,4 GΩ
2 min	10,8 GΩ	11,0 GΩ	10,9 GΩ
3 min	14,6 GΩ	14,8 GΩ	14,8 GΩ
4 min	18,1 GΩ	18,4 GΩ	18,2 GΩ
5 min	21,4 GΩ	21,6 GΩ	21,6 GΩ
6 min	24,0 GΩ	24,6 GΩ	24,4 GΩ
7 min	27,0 GΩ	27,6 GΩ	27,4 GΩ
8 min	29,6 GΩ	30,4 GΩ	30,0 GΩ
9 min	32,4 GΩ	32,6 GΩ	32,6 GΩ
10 min	34,8 GΩ	35,2 GΩ	35,0 GΩ
I.P. = $R_{10}/R_1$	5,44	5,41	5,47

Tabela 5.2: Resultados das medidas da resistência de isolamento das barras de fundo do estator.

Dos resultados obtidos vamos corrigir os valores para a temperatura de 40 °C utilizando a equação 3.2 referida no parágrafo 3.1.4.3. Para o efeito vamos determinar  $K_T$  utilizando a expressão 3.3 vindo:

$$K_T = (0,5)^{(40-17,2)/10} = 0,206 \quad (5.6)$$

Assim obtemos as resistências para 40 °C seguintes:

Ranhura 121-156:

$$I_{R1}=1,32 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=7,17 \text{ G}\Omega$$

Ranhura 281-316:

$$I_{R1}=1,34 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=7,25 \text{ G}\Omega$$

Ranhura 441-476:

$$I_{R1}=1,32 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=7,21 \text{ G}\Omega$$

Com estes valores conseguimos calcular o I.P. utilizando a definição em [3.1.1.5](#) temos:

- Ranhura 133-144: I.P. = 5,44
- Ranhura 293-304: I.P. = 5,41
- Ranhura 453-464: I.P. = 5,47

Conclui-se que de acordo com os valores mínimos das Tabela [3.3](#), para a resistência de isolamento após 1 min ( $I_{R1}$ ) e Tabela [3.2](#) (classe F), para o I.P, os valores encontrados estão acima desses mínimos pelo que consideram-se os resultados obtidos muito satisfatórios o que demonstra uma montagem cuidada e verifica o projecto.





Figura 5.5: Medida da resistência de isolamento de 35 barras durante 1 min. isoladas por NOMEX. As restantes estão ligadas à terra

### 5.1.3 Medida da Resistência de Isolamento do enrolamento completo do estator

Pré requisitos: Toda as sondas de temperatura RTD/PT100 (12 no núcleo e 18 nas ranhuras) foram ligadas ao circuito de terra da central para evitar que fenómenos de indução e/ou eventual fecho de correntes as danificassem. A carcaça, núcleo e o barramento também foram ligados à terra.

Para efectuar a medida, levanta-se a ligação à terra da fase do barramento a ensaiar, assim como o correspondente terminal de neutro. As restantes fases (p.ex. V1, W1 e respectivos pontos de neutro V2, W2) permanecem ligados á terra.

Consultar desenho BSJ-240-3451495/03 em anexo

Verificou-se a capacidade entre cada fase e terra:

U1 – 1.092  $\mu$ F

V1 – 1.092  $\mu$ F

W1 – 1.092  $\mu$ F

A zona das barras a ensaiar foi isolada com papel NOMEX para evitar descargas parciais.

Vai utilizar-se tensão DC em vez de AC

$$U_{AC} = 2U_n + 1 \text{ (kV)} \quad (5.7)$$

$$U_{DC} = U_n \times 1,7 \times 50\% \text{ (kV)} = 6 \times 1,7 \times 50\% = 5,1 \text{ kV (DC)} \quad (5.8)$$

Equipamento de medida – Megger BM 21 e multímetro Fluke 187

Tensão de medida = 5.1 kV DC.

Temperatura Ambiente – 20,8 °C – Equipamento: Testo 625

Humidade do Ar – 61,5 % – Equipamento: Testo 625

Temperatura do enrolamento – 18 °C – Equipamento: Testo 625

Tempo	Ligações			
	U-VWE *	V-VWE **	W-UVE ***	E-UVW ****
1min	0,950	0,925	0,950	0,55
2 min	1,53	1,49	1,5	1,07
3 min	1,97	1,93	1,99	1,58
4 min	2,34	2,32	2,52	1,9
5 min	2,66	2,68	2,94	2,22
6 min	2,96	3,0	3,32	2,48
7 min	3,22	3,28	3,7	2,92
8 min	3,44	3,54	4,04	2,94
9 min	3,68	3,8	4,40	3,36
10 min	3,84	4,06	4,66	3,52
I.P. = R10/R1	4,04	4,38	4,9	6,4

Tabela 5.3: Resultados das medidas da resistência de isolamento do enrolamento completo do estator. Valores em GΩ

\* - Levanta-se a ligação à terra da fase U tanto na ligação de fase como na ligação de neutro, isto é levanta-se U1 e U2. Todas as outras fases permanecem ligadas à terra.



\*\* - Levanta-se a ligação à terra da fase V tanto na ligação de fase como na ligação de neutro, isto é levanta-se V1 e V2. Todas as outras fases permanecem ligadas à terra.

\*\*\* - Levanta-se a ligação à terra da fase W tanto na ligação de fase como na ligação de neutro, isto é levanta-se W1 e W2. Todas as outras fases permanecem ligadas à terra.

\*\*\*\* - Todas as fases permanecem ligadas à terra assim como os pontos de neutro. A medida é efectuada entre os terminais de uma das fases e a terra.

Foi calculado o Índice de Polarização (I.P.) cujo valor apresenta-se na tabela.

Nota de segurança: entre cada medida de fase e antes do manuseamento dos shunts ou ligação de equipamento, descarregamos as correntes capacitivas do enrolamento, utilizando uma vara de manobra e curto circuitando os terminais que estiveram sob ensaio e a massa.

Verificou-se a capacidade das 3 fases à terra utilizando o multímetro: U1, V1, W1 = 1,76  $\mu\text{F}$

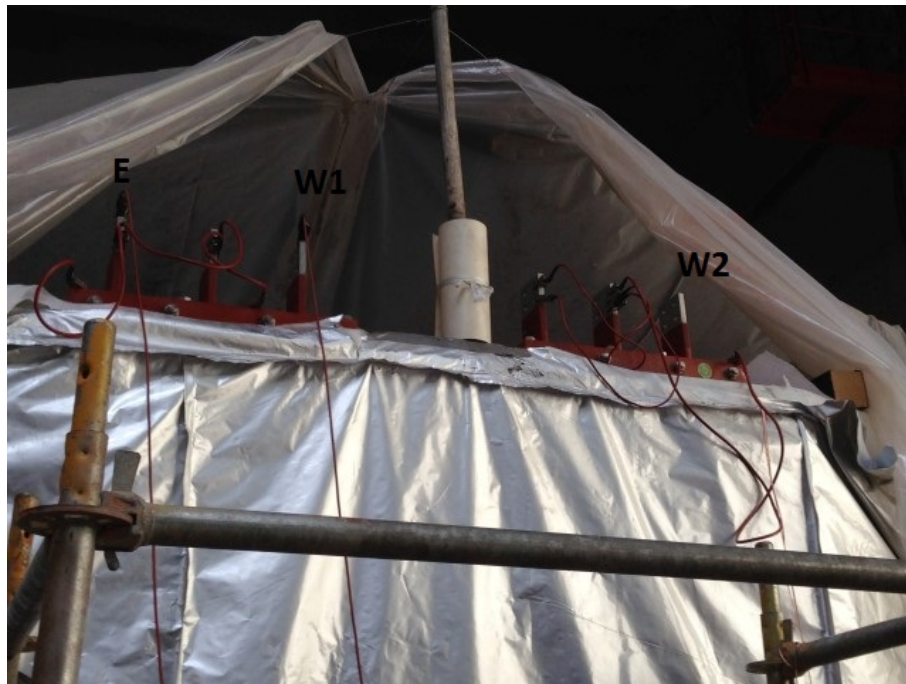


Figura 5.6: Medida da resistência de isolamento da fase W do estator.



Figura 5.7: Medida da resistência de isolamento da fase W do estator - equipamento.

Dos resultados obtidos vamos corrigir os valores para a temperatura de 40 °C utilizando a equação 3.2 referida no parágrafo 3.1.4.3. Para o efeito vamos determinar  $K_T$  utilizando a expressão 3.3 vindo:

$$K_T = (0,5)^{(40-18)/10} = 0,218 \quad (5.9)$$

Assim obtemos as resistências para 40 °C seguintes:

Fase U:

$$I_{R1} = 0,21 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=0,84 \text{ G}\Omega$$

Fase V:

$$I_{R1}=0,20 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=0,88 \text{ G}\Omega$$

Fase W:

$$I_{R1}=0,21 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=1,01 \text{ G}\Omega$$

Fases UVW-E:

$$I_{R1}=0,12 \text{ G}\Omega$$

$$I_{R10}=0,77 \text{ G}\Omega$$

Com estes valores conseguimos calcular o I.P. utilizando a definição em 3.1.1.5 temos:

- Fase U: I.P. = 4,04
- Fase V: I.P. = 4,39
- Fase W: I.P. = 4,91
- Fase E-UVW: I.P. = 6,4

Conclui-se que de acordo com os valores mínimos das Tabela 3.3, para a resistência de isolamento após 1 min ( $I_{R1}$ ) e Tabela 3.2 (classe F), para o I.P, os valores encontrados estão acima desses mínimos pelo que consideram-se os resultados obtidos muito satisfatórios o que demonstra uma montagem cuidada e verifica o projecto.

Note-se ainda a baixa capacidade de cada fase à terra pode originar uma corrente capacitiva residual que não afecta a medida efectuada.

## 5.2 Ensaios de alta tensão

Conforme o descrito em 2.2 e 3.1.2, realizou-se o ensaio de alta tensão às barras do estator seguindo a norma IEC 60034-1, 9.2.

No sentido da despistagem de eventuais erros de montagem e prevenir posteriores medidas correctivas que necessariamente envolveriam mais meios humanos e técnicos são realizados dois ensaios intermédios de alta tensão do estator, ainda durante a fase de montagem do estator, a saber:

- Ensaio de alta tensão às barras de fundo do estator.
- Ensaio de alta tensão às barras de topo do estator.

- Ensaio de alta tensão ao enrolamento completo do estator Apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios realizados assim como o procedimento adoptado para os obter.

Os ensaios foram realizados na presença dos representantes da empresa fiscalizadora e do cliente EDP.

### 5.2.1 Ensaio de alta tensão às barras de fundo do estator

Pré requisitos: os mesmos dos definidos para a medida da resistência de isolamento

Vai utilizar-se tensão DC em vez de AC

$$U_{DC} = (2U_n + 1) \times 1,7 + 15\% (kV) = 25,4kV (DC) \quad (5.10)$$

A tensão é aplicada durante 1 min.

Equipamento de medida – BAUR PGK 50E, Índice n. 1670

A majoração em 15% da tensão de ensaio permite avaliar à partida a boa condição da montagem das barras, nomeadamente o isolamento.

São ensaiados 3 conjuntos de 12 barras correspondentes às 3 zonas de junção da carcaça.

Tipo de ligação: Barras de fundo - E

A subida de tensão é lenta e regista-se o valor da corrente após 1 minuto da aplicação da tensão final.

Tempo	Ligações		
	Ranhura 293-304	Ranhura 453-464	Ranhura 133-144
1min	I = 400 $\mu$ A	I = 310 $\mu$ A	I = 500 $\mu$ A
Resultado	passou	passou	passou

Tabela 5.4: Resultados do ensaio de alta tensão às barras de fundo do estator



Figura 5.8: Equipamento para ensaio de alta tensão

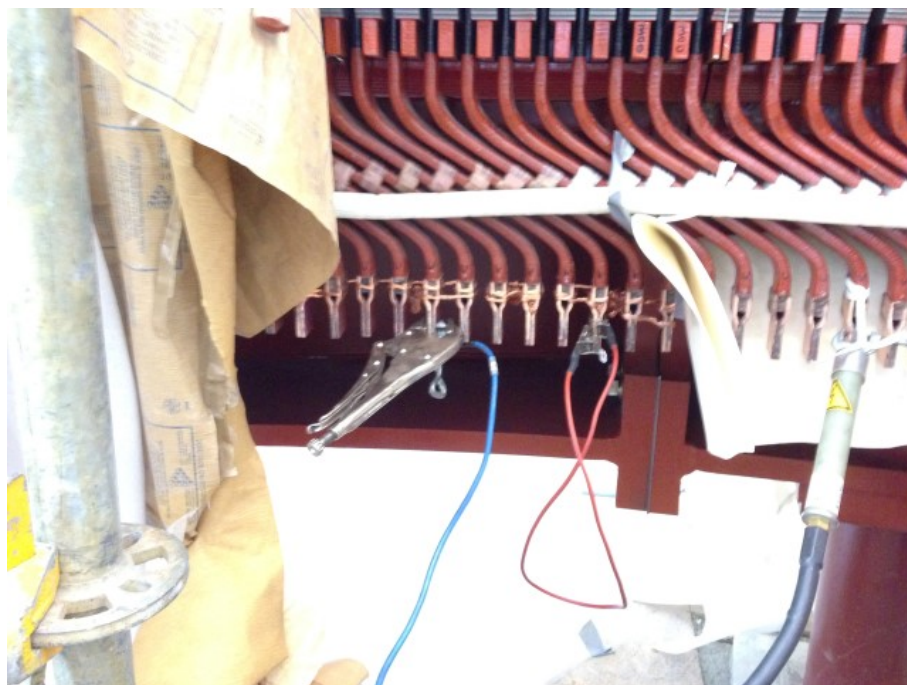


Figura 5.9: 12 Barras a ensaiar com as ligações à terra levantadas e isoladas das adjacentes por Nomex.

### 5.2.2 Ensaio de alta tensão às barras de topo do estator

Pré requisitos: os mesmos dos definidos para a medida da resistência de isolamento

Vai utilizar-se tensão DC em vez de AC

$$U_{DC} = (2U_n + 1) \times 1,7 + 10\% (kV) = 24,3kV (DC) \quad (5.11)$$

A tensão é aplicada durante 1 min.

Equipamento de medida – BAUR PGK 50E, Índice n. 1670

A majoração em 10% da tensão de ensaio permite avaliar à partida a boa condição da montagem das barras, nomeadamente o isolamento.

São ensaiados 3 conjuntos de 35 barras correspondentes às 3 zonas de junção da carcaça.

Tipo de ligação: Barras de topo - E A subida de tensão é lenta e regista-se o valor da corrente após 1 minuto da aplicação da tensão final.

Tempo	Ligações		
	Ranhura 121-156	Ranhura 281-316	Ranhura 441-476
1min	I = 350 $\mu$ A	I = 300 $\mu$ A	I = 420 $\mu$ A
Resultado	passou	passou	passou

Tabela 5.5: Resultados do ensaio de alta tensão às barras de topo do estator



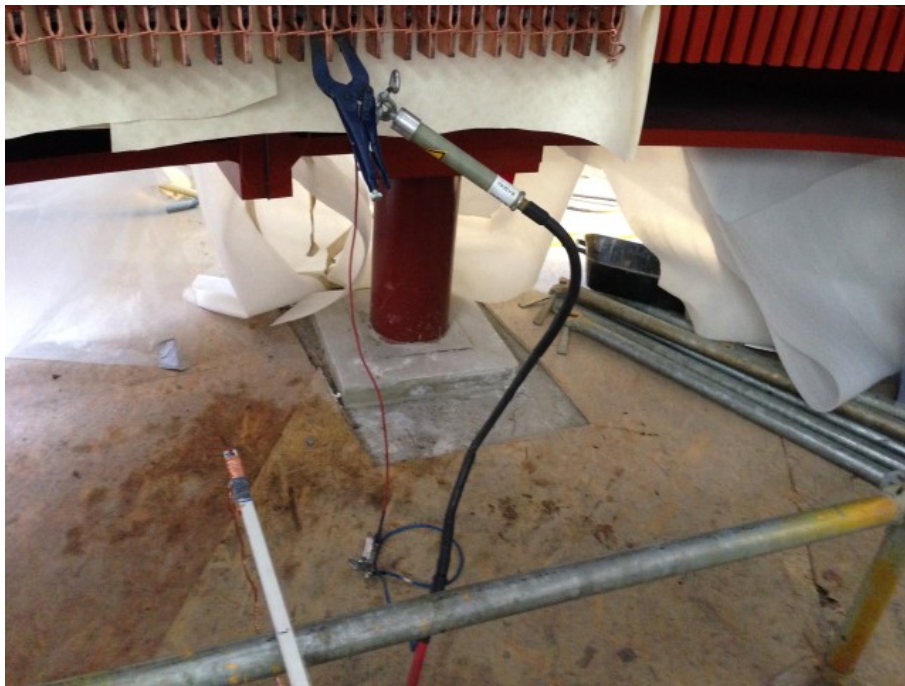


Figura 5.10: Ensaio de alta tensão a 35 barras de topo do estator

### 5.2.3 Ensaio de alta tensão ao enrolamento completo do estator

Pré requisitos: os mesmos dos referidos para a medida da resistência de isolamento do enrolamento completo.

Vai utilizar-se tensão DC em vez de AC

$$U_{DC} = (2U_n + 1) \times 1,7 (kV) = 22,1kV (DC) \quad (5.12)$$

A tensão é aplicada durante 1 min.

Equipamento de medida – BAUR PGK 50E, Índice n. 1670

São ensaiadas as 3 fases.

Tipo de ligação: Fase - E

A subida de tensão é lenta e regista-se o valor da corrente após 1 minuto da aplicação da tensão final.

Tempo	Ligações		
	U-VWE *	V-VWE **	W-UVE ***
1min	I = 370 $\mu$ A	I = 320 $\mu$ A	I = 410 $\mu$ A
Resultado	passou	passou	passou

Tabela 5.6: Resultados do ensaio de alta tensão ao enrolamento completo do estator.



Figura 5.11: Ensaio de alta tensão ao enrolamento da fase U





Figura 5.12: Ensaio de alta tensão ao enrolamento da fase V

### 5.3 Medida da Resistência entre barras de topo e núcleo

Por forma a verificar a correcta instalação das barras e o seu isolamento em relação ao núcleo, mede-se a resistência entre cada uma das 35 barras e o núcleo do circuito magnético.

O valor médio dos resultados é inferior a  $3.5\text{ k}\Omega$  o que é inferior a  $5\text{ k}\Omega$  e portanto satisfatório

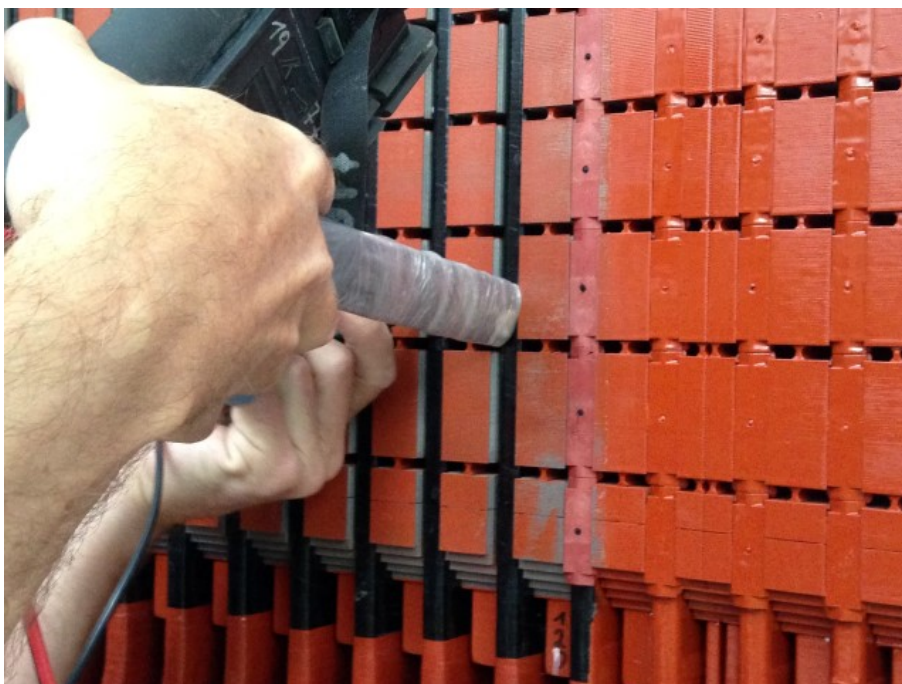


Figura 5.13: Medida da resistência entre barra e núcleo com ohmímetro

#### 5.4 Medida da Resistência das sondas de temperatura RTD/PT100

Por forma a verificar a correcta instalação e funcionamento das sondas de temperatura, efectua-se a medida da resistência das mesmas. O desenho BSJ-240-3451495/03 em anexo, evidencia a localização das sondas cuja designação consta da Tabela 5.7 e Tabela 5.8 abaixo.

Utilizando o multímetro digital Fluke 189, mede-se a resistência de cada sonda de temperatura RTD/PT100. As sondas estão localizadas no núcleo e nas ranhuras, e distribuídas nas três zonas de junção do estator. As medidas são tiradas em cada uma das zonas.

Mede-se primeiro a resistência do fio condutor que liga cada uma das sondas (2 fios vermelhos). O valor situa-se em torno dos  $2,3 \Omega$  que temos de deduzir á leitura de cada valor de resistência observado. Na tabela seguinte já se encontra o valor final depois de deduzido o valor da resistência do fio ( $2,3 \Omega$ ).

RTD das Ranhuras		
Ref. <sup>a</sup>	N. <sup>o</sup> Ranhura	$\Omega$
MLA20 CT001	330	106,7
MLA20 CT002	170	107,0
MLA20 CT003	10	106,7
MLA20 CT004	329	106,7
MLA20 CT005	289	106,8
MLA20 CT006	249	107,0
MLA20 CT007	209	106,9
MLA20 CT008	169	107,0
MLA20 CT009	129	107,0
MLA20 CT0010	89	106,9
MLA20 CT0011	49	106,8
MLA20 CT0012	9	106,9
MLA20 CT0013	449	106,9
MLA20 CT0014	409	106,8
MLA20 CT0015	369	106,8
MLA20 CT0016	330	106,8
MLA20 CT0017	170	106,9
MLA20 CT0018	10	106,8

Tabela 5.7: Medida da resistência das sondas de temperatura das ranhuras.

RTD do Núcleo		
Ref. <sup>a</sup>	N.º Ranhura	$\Omega$
MLA30 CT00-B01	368/369	107,8
MLA30 CT002-B01	48/49	107,7
MLA30 CT003-B01	298/299	107,9
MLA30 CT004-B01	368/369	107,7
MLA30 CT005-B01	48/49	107,8
MLA30 CT006-B01	298/299	107,9
MLA30 CT007-B01	368/369	107,7
MLA30 CT008-B01	48/49	107,8
MLA30 CT009-B01	298/299	107,8
MLA30 CT0010-B01	368/369	107,7
MLA30 CT0011-B01	48/49	107,8
MLA30 CT0012-B01	298/299	107,8

Tabela 5.8: Medida da resistência das sondas de temperatura do núcleo.

## 5.5 Medida da Resistência de isolamento das sondas de temperatura RTD/PT100

Após a medida da resistência verificada no ponto anterior, verifica-se o adequado isolamento das sondas. Para o efeito efectua-se a medida da resistência de isolamento

Todas as sondas encontram-se ligadas entre si e à terra. Com o equipamento de medida Megger BM 21, aplica-se uma tensão DC de 2600 V durante 1 min e verifica-se o valor da resistência de isolamento. Para o efeito levanta-se da ligação equipotencial à terra o conjunto de sondas a ensaiar a saber:

- Conjunto de sondas das ranhuras 121 a 156.
- Conjunto de sondas das ranhuras 281 a 316.
- Conjunto de sondas das ranhuras 441 a 476.

Cada conjunto corresponde a uma das três zonas de união do estator.

Deveria ter-se verificado as do núcleo utilizando o mesmo processo. Como já vinham instaladas de fábrica não foi efectuado novo ensaio de isolamento às RTD do núcleo, em obra.

Tempo	RTD/PT100		
	Ranhura 121-156	Ranhura 281-316	Ranhura 441-476
1min	98,5 GΩ	177 GΩ	172 GΩ
Resultado	passou	passou	Passou

Tabela 5.9: Resultados da medida da resistência de isolamento das sondas de temperatura das ranhuras.



Figura 5.14: Medida da resistência de isolamento das sondas de temperatura das ranhuras

## 5.6 Ensaaios do Rotor

O rotor da máquina é do tipo de polos salientes. Os polos são inseridos no circuito magnético, neste caso designado de roda polar, por intermédio de cavilhas com aperto mecânico pela parte interior da roda polar.

### 5.6.1 Verificação do correcto binário de aperto dos polos

Após a montagem do polos um dos primeiros ensaios é o da verificação do correcto binário de aperto e folga.

As forças centrífugas que actuarão quando o rotor estiver em movimento serão aplicadas fundamentalmente nos polos. Entre os polos e a roda polar é instalada uma borracha cuja constante de elasticidade permite algum movimento radial dos polos. A verificação do correcto binário de aperto dos polos e a sua movimentação radial visa garantir que é assegurado um entreferro constante assim como uma correcta fixação dos polos.

O procedimento consta em instalar na parte exterior dos polos de dois comparadores medindo-se nos dois pontos de aperto o deslocamento dos polos. Da parte interior, utilizando uma máquina de aperto pneumática, apertam-se os polos com o binário indicado no projecto, verifica-se o deslocamento dos polos com os comparadores.



Figura 5.15: Comparadores instalados num polo

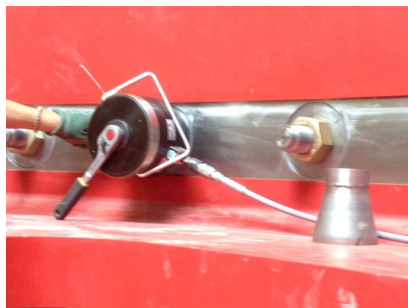


Figura 5.16: Aperto do perno inferior de fixação de um polo





Figura 5.17: Vista do interior da roda polar



Figura 5.18: Aperto do perno inferior de fixação de um polo



Figura 5.19: Introdução de um polo

### 5.6.2 Medida da resistência de isolamento

Realizou-se o ensaio da medida da resistência de isolamento do enrolamento rotórico completo da máquina. O objectivo é o de despistar eventuais erros de montagem evitando as medidas correctivas e posterior desmontagem de polos.

Características da Máquina:  $U_n = 6\text{kV}$

Classe de isolamento – F

Sistema de isolamento – VPI

Pré requisitos: A roda magnética polar foi ligada ao circuito de terra da central para evitar que fenómenos de indução e/ou eventual fecho de correntes induzissem erros nas leituras.

Para efectuar a medida, aplica-se a tensão de ensaio entre um terminal da bobinagem, constituída pelo conjunto dos 40 polos, e a massa (roda polar).

Consultar desenho BSJ-240-3451543 em anexo

A zona de passagem dos cabos das pontas de ensaio dos equipamentos de medida foi isolada com papel NOMEX para evitar fenómenos de indução que originassem erros na medida.

Equipamento de medida – Megger BM 21 Tensão de medida = 1 kV DC.

Temperatura Ambiente – 21,6 °C – Equipamento: Teste 625

Humidade do Ar – 56,5 % – Equipamento: Teste 625

Temperatura do enrolamento –21 °C – Equipamento: Teste 625

A norma interna P GEN QC2426/15DE, define a realização do ensaio para medida da resistência de isolamento aplicando uma tensão DC de 1000V entre uma extremidade do enrolamento e a massa durante 1 min.

Nessas condições, o primeiro valor medido foi de 50 MΩ, o que é um valor demasiado baixo para a resistência de isolamento do enrolamento rotórico.

Efectuou-se uma limpeza dos 40 polos com ar comprimido.

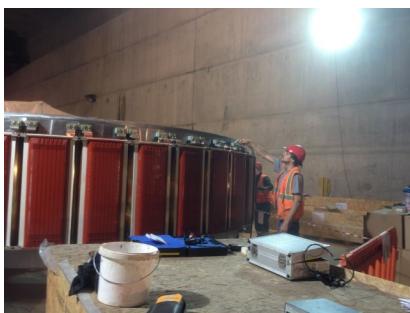


Figura 5.20: Limpeza dos polos com ar comprimido



Figura 5.21: Ligações para a medida da resistência de isolamento



Após a limpeza os valores obtidos para a resistência de isolamento foram:

Tempo	Tensão aplicada
	1000 VDC
1min	8,35 GΩ

Tabela 5.10: Medida da resistência de isolamento após 1 min.

Nota de segurança: entre cada medida e antes do manuseamento dos shunts ou ligação de equipamento, descarregamos as correntes capacitivas do enrolamento, utilizando uma vara de manobra e curto circuitando os terminais que estiveram sob ensaio e a massa.



Figura 5.22: Execução da medida da resistência de isolamento.

### 5.6.3 Ensaio de alta tensão

Pré requisitos: os mesmos do ponto anterior

Vai utilizar-se tensão DC. Para cálculo da tensão a aplicar considera-se a tensão de ensaio referida no desenho BSJ-240-3451543 em anexo.

$$U_{ensaio} = 1,5 \text{ (kV)}$$

$$U_{DC} = U_{ensaio} \times 1,7 (kV) = 2,55kV (DC) \quad (5.13)$$

Durante 1 min.

Equipamento de medida – Megger BM 21

Tipo de ligação: idêntica à do ponto anterior

A subida de tensão é lenta e regista-se o valor da resistência de isolamento após 1 minuto da aplicação da tensão final.

Tempo	Tensão aplicada
	2550 VDC
1min	7,15 GΩ

Tabela 5.11: Resultado do ensaio de alta tensão.



Figura 5.23: Valor obtido no ensaio de alta tensão.

#### 5.6.4 Cálculo da impedância de cada polo

Para calcular a impedância de cada polo, aplica-se a tensão composta alternada da rede de 420 V AC aos terminais do enrolamento. Com uma pinça amperimétrica verifica-se qual a corrente absorvida pelo circuito. Utilizando um multímetro digital mede-se polo a polo qual a queda de tensão verificada ( $\Delta U$ ). O quociente entre a  $\Delta U$  e a corrente, dá-nos a impedância do polo.

A tolerância da medida é no máximo 10%. Na tabela seguinte apresentam-se os resultados.

Polo n.º	Queda de tensão do polo $\Delta U$ (V)	Tensão total (V)	Corrente I (A)	Impedância do polo Z ( $\Omega$ )
1	10,34	411	28,9	0,36
2	10,12	411	28,9	0,35
3	10,38	411	28,9	0,36
4	10,08	411	28,9	0,35
5	10,34	411	28,9	0,36
6	10,13	411	28,9	0,35
7	10,52	411	28,9	0,36
8	10,24	411	28,9	0,35
9	10,52	411	28,9	0,36
10	10,20	411	28,9	0,35
11	10,39	411	28,9	0,36
12	9,97	411	28,9	0,34
13	10,47	411	28,9	0,36
14	10,11	411	28,9	0,35
15	10,43	411	28,9	0,36
16	10,07	411	28,9	0,35
17	10,50	411	28,9	0,36
18	10,12	411	28,9	0,35
19	10,47	411	28,9	0,36
20	10,20	411	28,9	0,35

Tabela 5.12: Cálculo da impedância do polo n.º 1 ao polo n.º 20.

Polo n.º	Queda de tensão do polo $\Delta U$ (V)	Tensão total (V)	Corrente I (A)	Impedância do polo Z ( $\Omega$ )
21	10,46	411	28,9	0,36
22	10,23	411	28,9	0,35
23	10,42	411	28,9	0,36
24	10,22	411	28,9	0,35
25	10,47	411	28,9	0,36
26	10,19	411	28,9	0,35
27	10,49	411	28,9	0,36
28	10,25	411	28,9	0,35
29	10,62	411	28,9	0,37
30	10,15	411	28,9	0,35
31	10,40	411	28,9	0,36
32	10,11	411	28,9	0,35
33	10,52	411	28,9	0,36
34	10,15	411	28,9	0,35
35	10,14	411	28,9	0,35
36	10,09	411	28,9	0,35
37	10,39	411	28,9	0,36
38	10,12	411	28,9	0,35
39	10,46	411	28,9	0,36
40	10,17	411	28,9	0,35

Tabela 5.13: Cálculo da impedância do polo n.º 21 ao polo n.º 40.

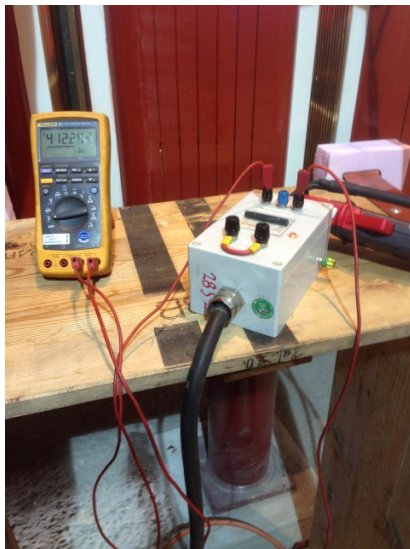


Figura 5.24: Medida tensão total



Figura 5.25: Medida tensão de um polo



Figura 5.26: Ligação da alimentação

### 5.6.5 Medida da resistência ôhmica do enrolamento rotórico

O procedimento consiste em injectar 5 A da fonte de corrente nos terminais do enrolamento rotórico. No polo negativo da fonte intercala-se em série com o terminal do enrolamento uma resistência de valor  $0,02 \Omega$  (shunt). Mede-se a queda de tensão na resistência e no enrolamento. A resistência é dada pelo quociente entre a tensão verificada no enrolamento e a corrente injectada.

Tensão aplicada	0,55 VDC
Corrente aplicada	5 A
Tensão medida no enrolamento	244,69 mV
Tensão medida na resistência	99,93 mV

Tabela 5.14: Resultados para cálculo da resistência do enrolamento rotórico.

Cálculo da resistência:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,24469}{5} = 0,048\Omega \quad (5.14)$$

para uma temperatura do enrolamento de 21 °C

A resistência do enrolamento calculada em fase de projecto para a temperatura de 20°C é de 0,0458Ω pelo que o valor verificado é coerente com o projecto.



Figura 5.27: Fonte de alimentação



Figura 5.28: Resistência shunt.



Figura 5.29: Montagem para a medida



Figura 5.30: Valores obtidos.

### 5.6.6 Verificação da polaridade dos polos do enrolamento rotórico

Utiliza-se uma fonte de corrente e injecta-se 5 A no enrolamento rotórico. Com uma bússola magnética percorrem-se os 40 polos verificando-se a alternância entre Norte (N) e sul (S).



Figura 5.31: Montagem para verificação da polaridade



Figura 5.32: Polaridade de um polo.

## 5.7 Conclusões

As medidas foram efectuadas com equipamentos calibrados e certificados. Foram exibidos os certificados de calibração antes do início de cada ensaio. A duração de cada ensaio é variável consoante as dificuldades encontradas e/ou eventuais desvios em relação aos resultados esperados. Habitualmente cada ensaio dura meio-dia de trabalho.

Em certas situações é necessária uma consulta à equipa de projecto nos escritórios da empresa em Weiz na Áustria como foi o caso em que no primeiro ensaio para medida da resistência de isolamento do rotor foi obtido um valor muito baixo.

Os equipamentos de manobra, nomeadamente as varas de curto-circuito à terra foram verificadas e as medidas de segurança sempre observadas.





## Capítulo 6

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo apresentam-se as conclusões da dissertação e possíveis desenvolvimentos de trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Os procedimentos de ensaios foram aplicados à máquina instalada no grupo dois (G2) do escalão de jusante o que significa que os resultados obtidos assim como as conclusões sobre os mesmos dizem respeito a esta máquina.

A escolha desta máquina em detrimento das outras três do empreendimento prende-se única e exclusivamente com o andamento dos trabalhos em curso particularmente os de colocação em serviço.

O mesmo procedimento de ensaios será aplicado às restantes três máquinas dos aproveitamentos.

O empreendimento, desde a sua fase de execução, tem sofrido vários atrasos motivados por questões de ordem arqueológica no seu início, melhoria dos acessos, alguns acidentes com pessoal e indefinições de projecto. Os atrasos têm sido recuperados pelo reforço de equipas e alargamento dos horários de trabalho.

Não obstante este esforço de recuperação, o grupo 2 do escalão de jusante foi o único que se adiantou o suficiente por forma a garantir o maior número de dados de ensaios realizados sobre os quais recaíram as interpretações dos mesmos e conclusões.

A dissertação procurou ainda compatibilizar os procedimentos internos vigentes na empresa Andritz Hydro GmbH com as normas em vigor aplicáveis aos ensaios e colocações em serviço de alternadores síncronos.

Os resultados alcançados verificaram o recomendado pelas normas, o projecto e normas internas. Quando não foram obtidos resultados satisfatórios foram determinadas as causas e implementadas as medidas correctivas.

As condições de segurança de pessoas e equipamentos foram sempre observadas

Foi acordado com a EDP passar a referir os valores encontrados da resistência de isolamento a uma temperatura do enrolamento de 40 °C para registo e histórico.

O conjunto de ensaios realizados foram os ensaios dielectricos descritos nos pontos 4.1 e 4.2 do capítulo 4.

Serão ainda realizados os restantes descritos naquele capítulo e para todas as restantes máquinas.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Por uma questão de programa apenas se conseguiram efectuar os ensaios dieléctricos que corresponde a cerca de 1/5 do conjunto de ensaios a realizar.

O restante conjunto de ensaios a realizar pode ser objecto da redacção de *papers* dedicados ao tema.

A fórmula de cálculo da correcção da resistência de isolamento para a temperatura de 40 °C pode ainda ser objecto de actualização , já que a evolução dos mais modernos sistemas de isolamento determina alterações na forma de cálculo da correcção.

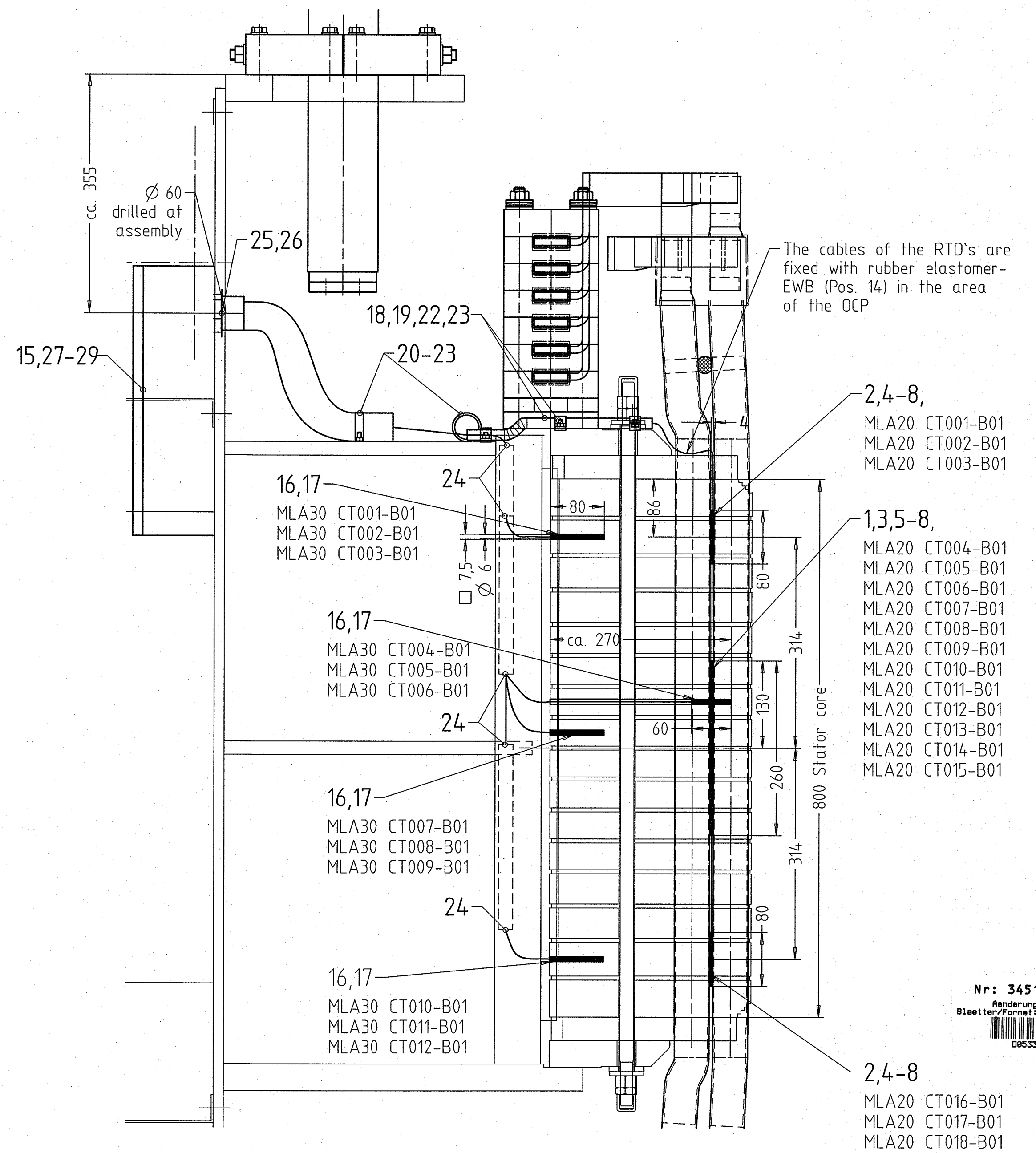
## **Anexo A**

### **A.1 Anexo 1**

Desenho BSJ-240-3451495/03

### **A.2 Anexo 2**

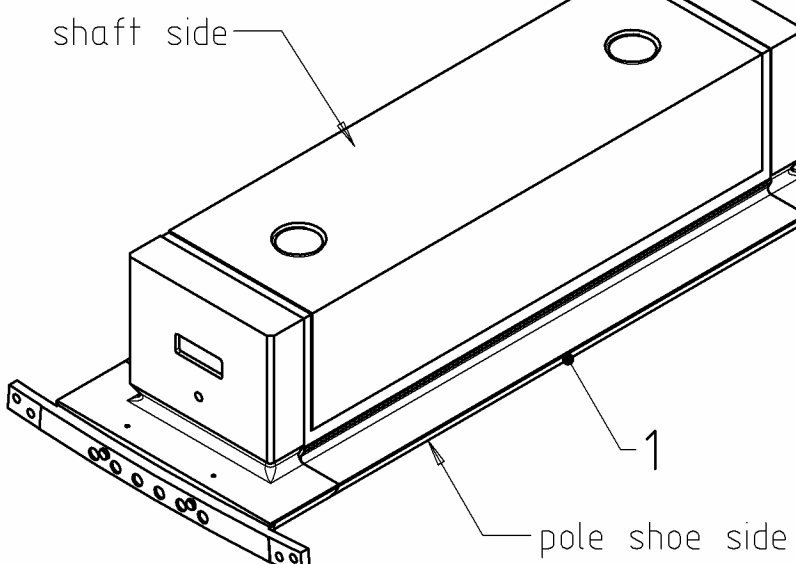
Desenho BSJ-240-3451543



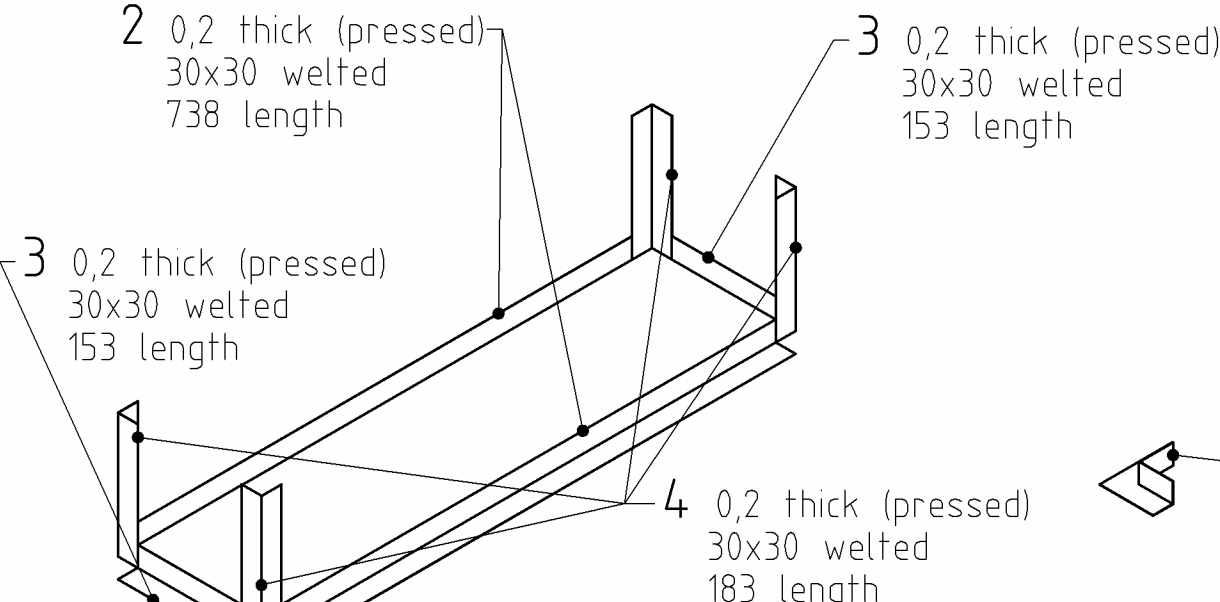
This drawing is the INTELLECTUAL PROPERTY of  
**ANDRITZ HYDRO GmbH**  
Penzingersstrasse 76  
A-1161 Wien AUSTRIA  
Observe the protection notice ISO 16016

Este documento é a PROPRIEDADE INTELECTUAL de  
**ANDRITZ HYDRO GmbH**  
Penzingersstrasse 76  
A-1161 Wien AUSTRIA  
Observe a norma de protecção ISO 16016



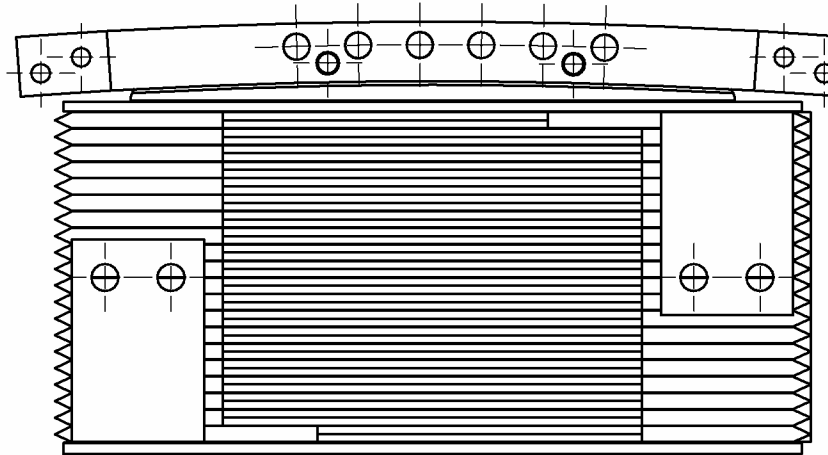


Step 1: Pole body with damper winding

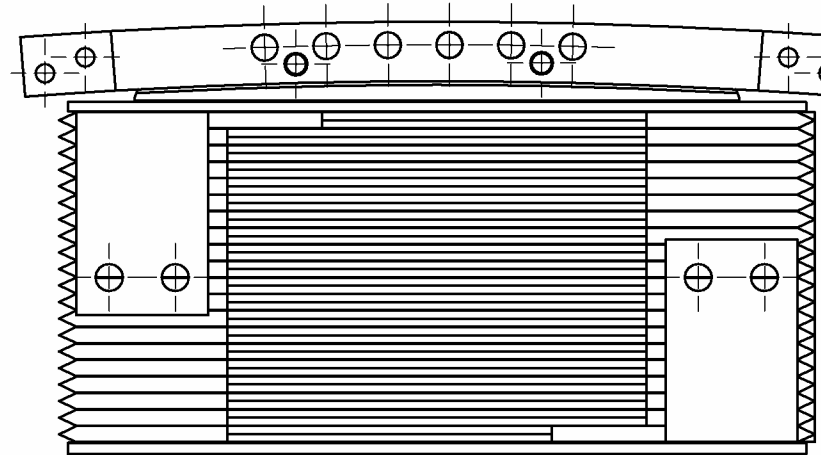


Step 2: Corner insulation on pole shoe side,  
long short and vertical parts

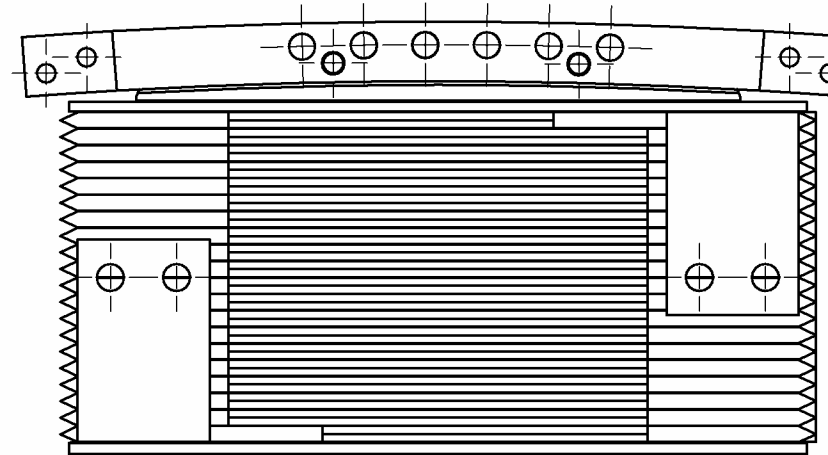
### Step 3: Corner insulation pieces on pole shoe side



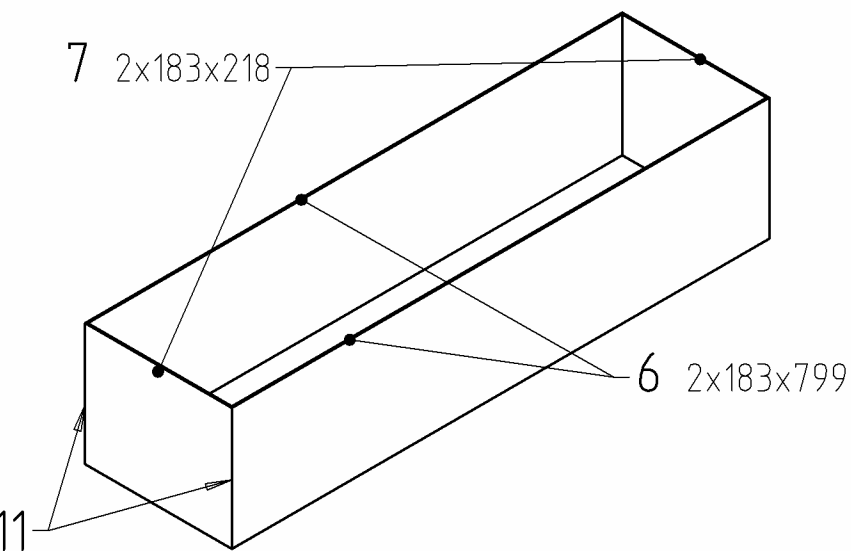
POLE 1,3,5,...,39  
SCALE 1:4



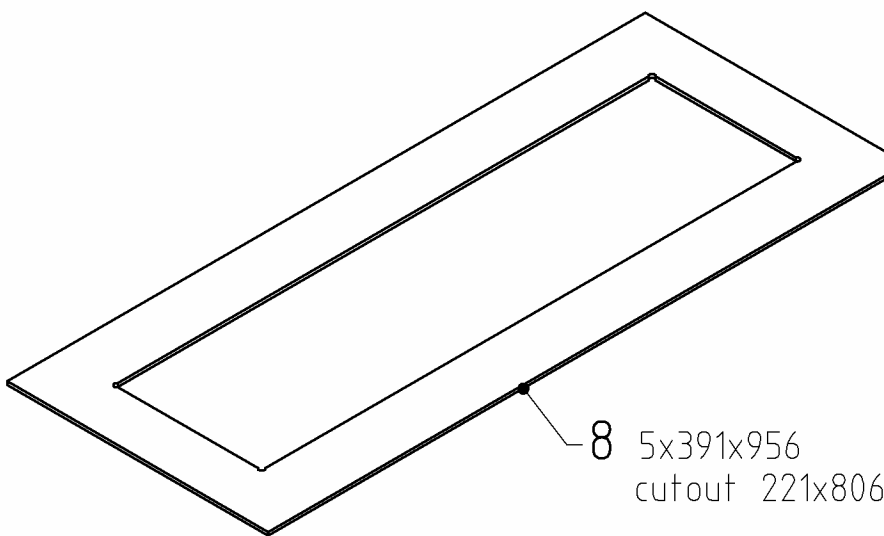
POLE 2,4,6,...,4  
SCALE 1:4



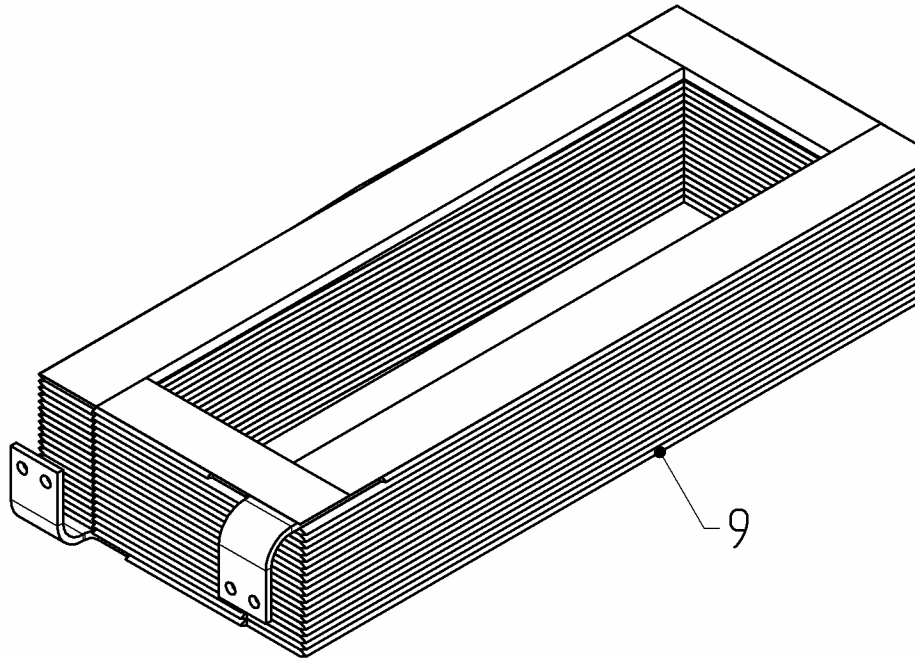
POLE SPARE  
SCALE 1:4



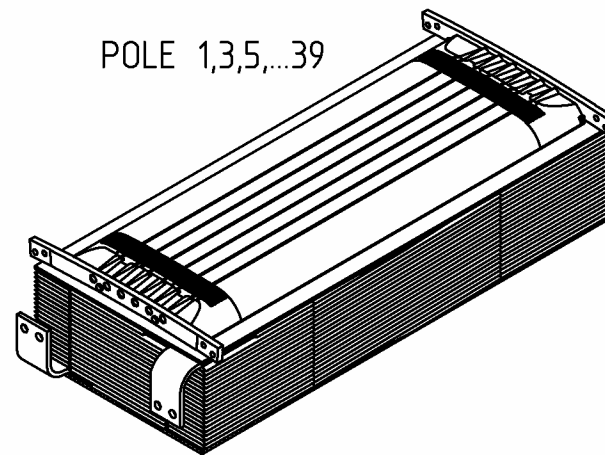
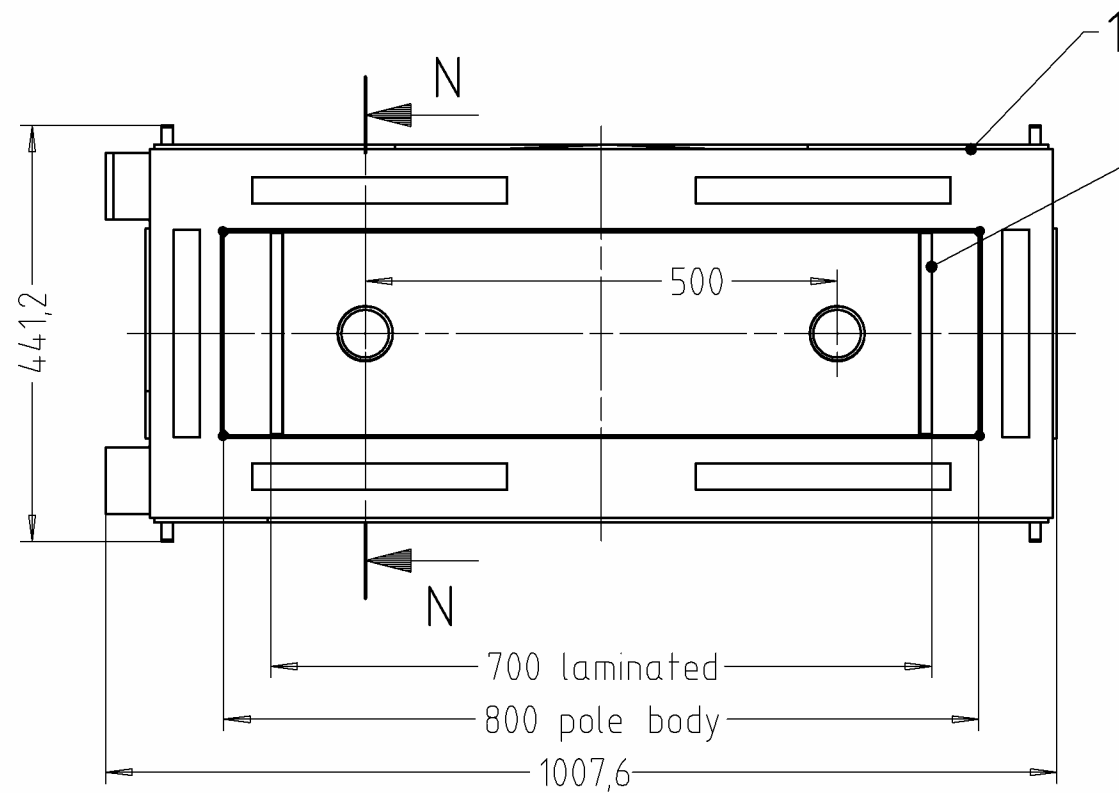
Step 4: Pole body insulation (long and short parts)



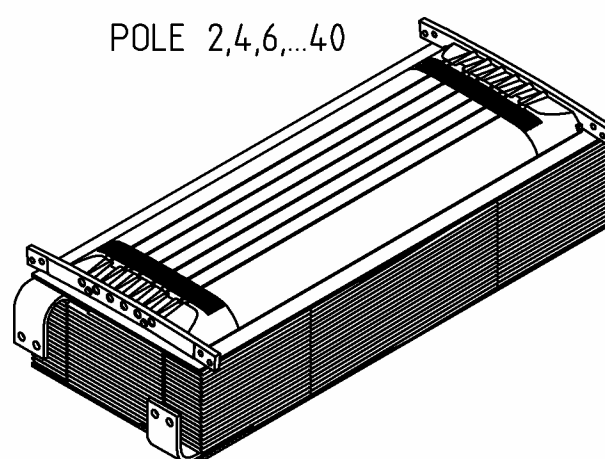
Step 5: Insulating frame, pole shoe side



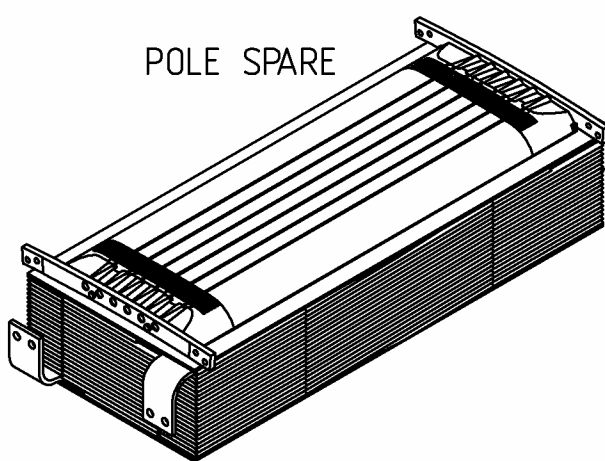
Step 6: Pole winding, winding insulation



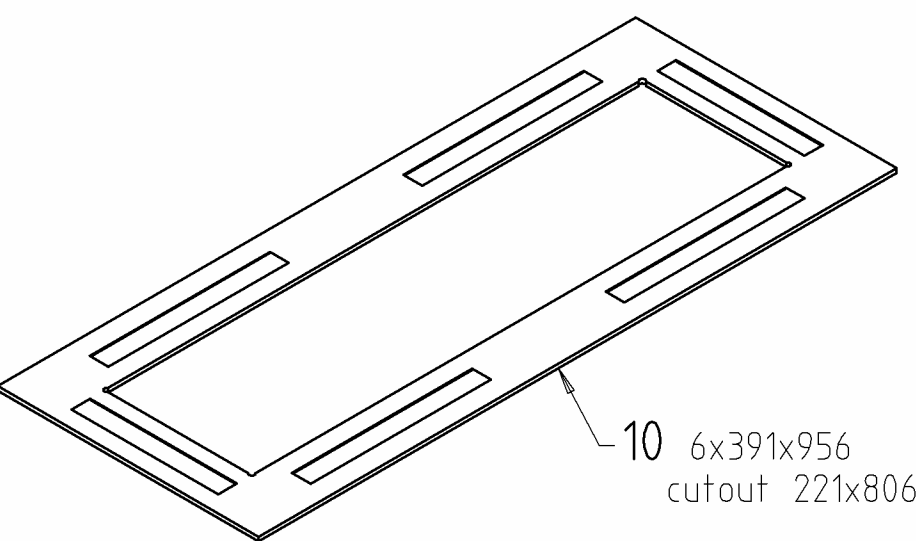
POLE 1,3,5,...39



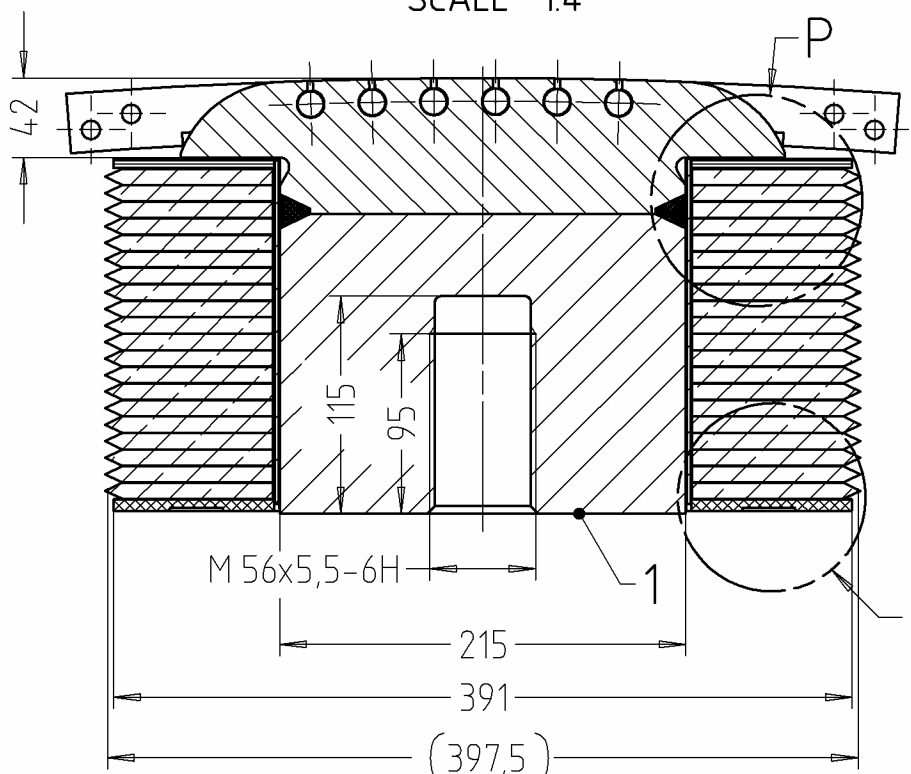
POLE 2.4.6...40



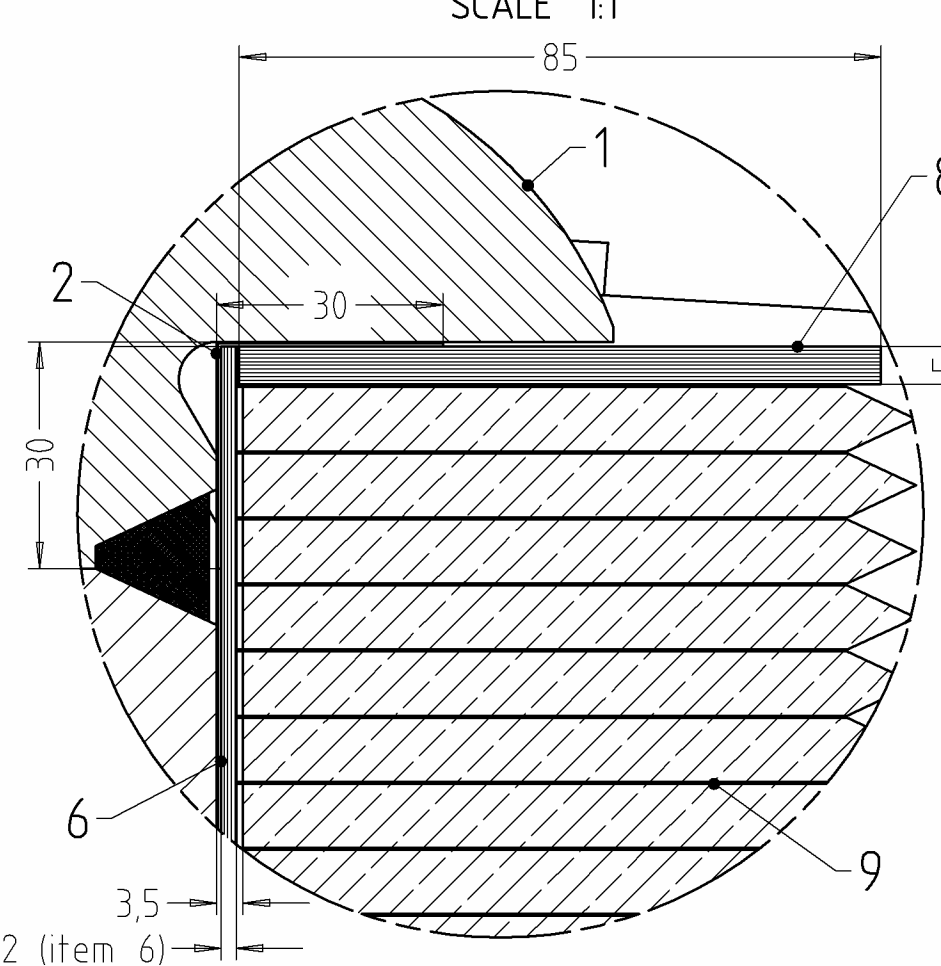
POLE SPARE



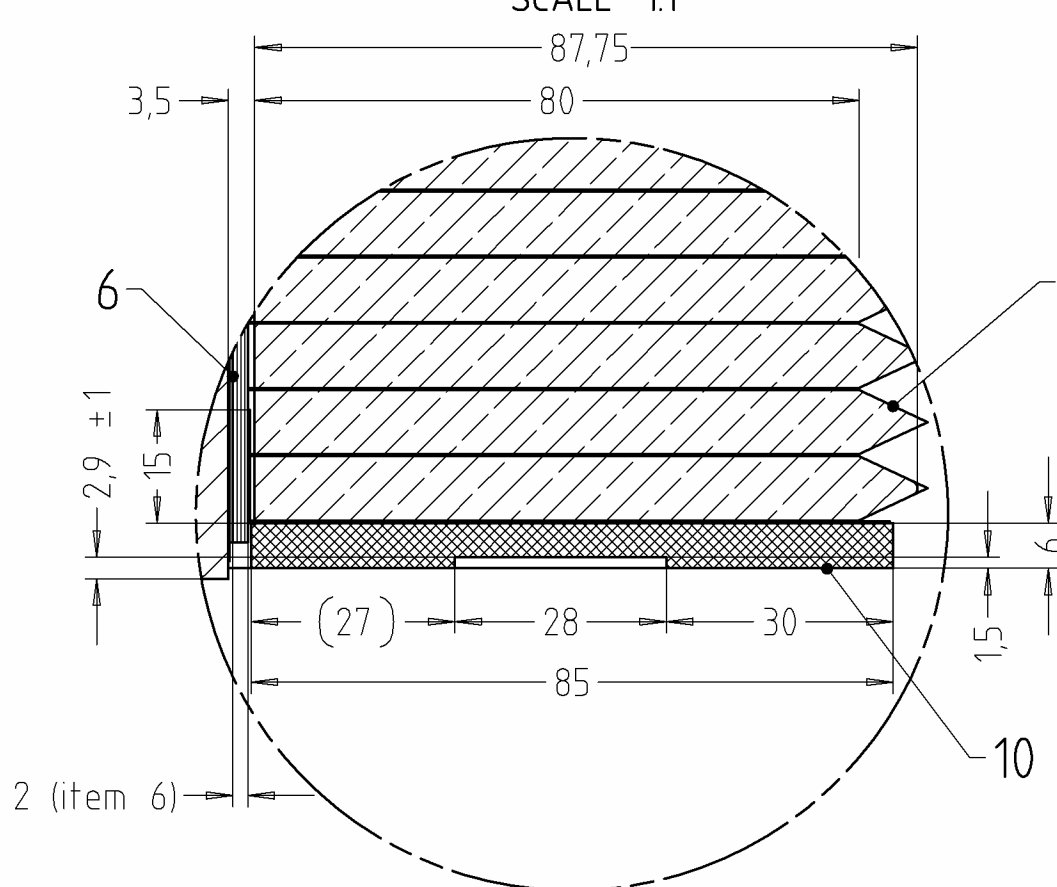
Step 7: Insulating frame, shaft side



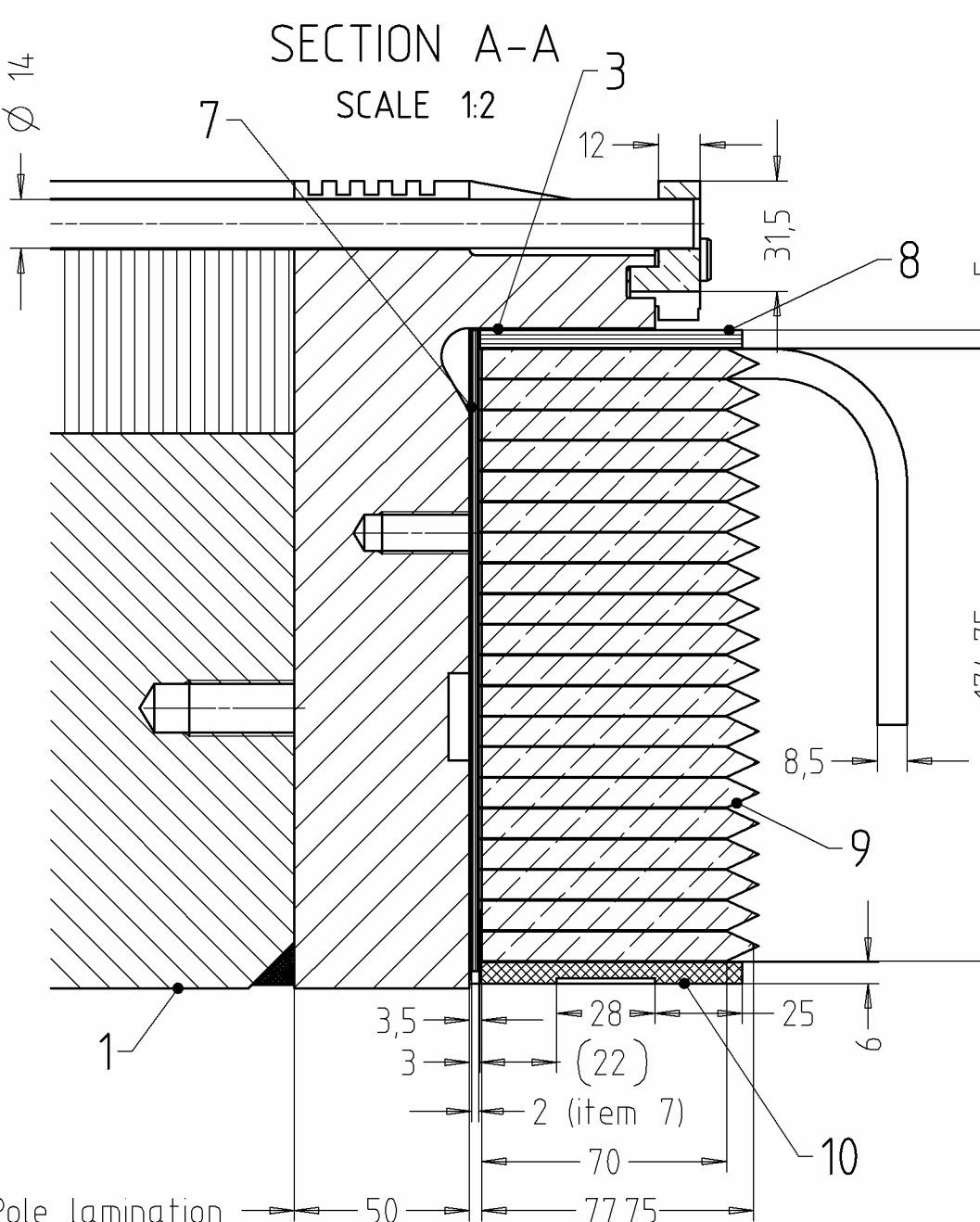
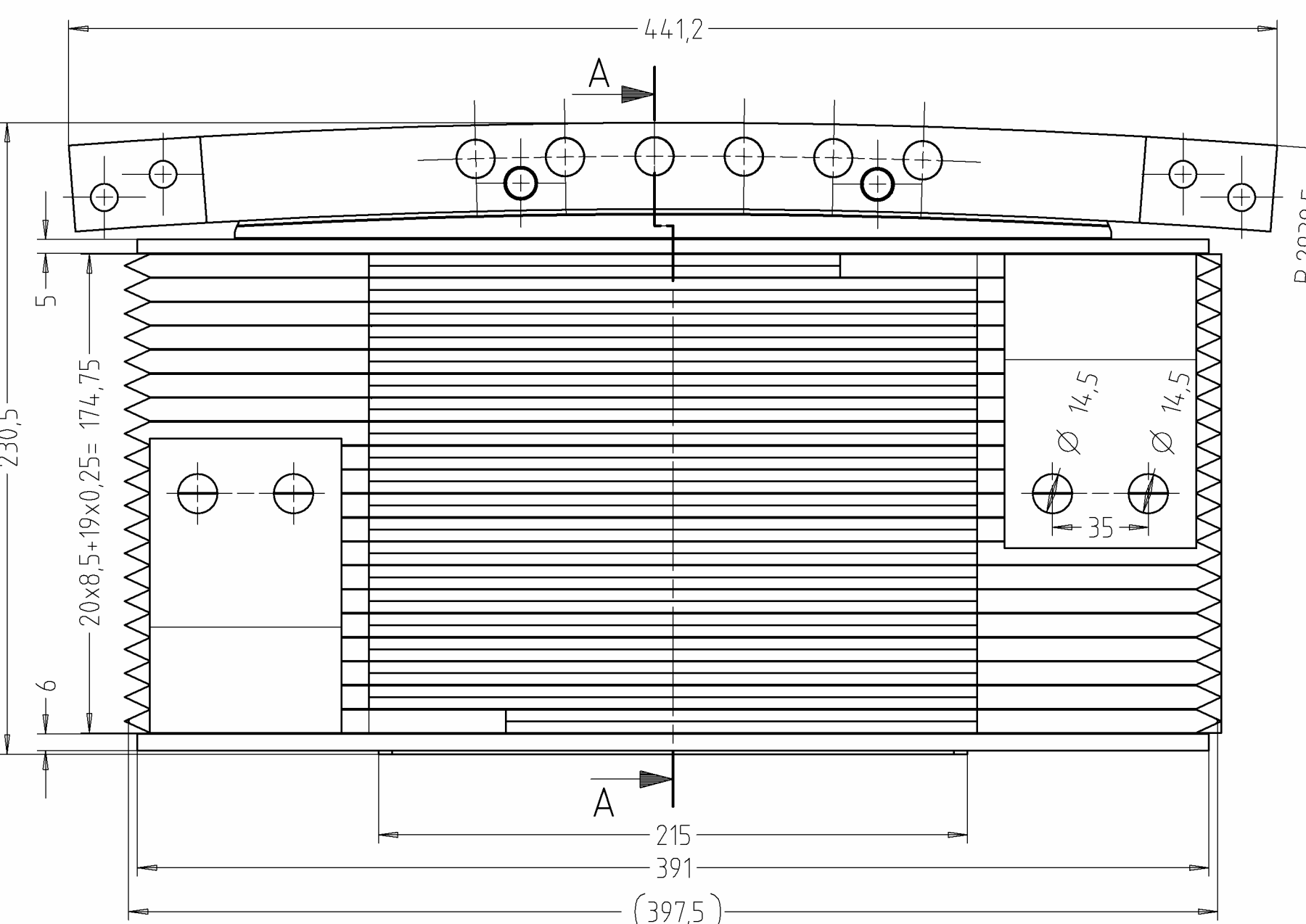
SECTION N-I  
SCALE 1:4



DETAIL P  
SCALE 1:1



DETAIL F  
SCALE 1:1



SECTION A-A  
SCALE 1:2

700 Pole lamination

Pole number: 40  
Frequency: 50 Hz  
Insulation class: F  
Rated speed: 150,0 1/min  
Runaway speed: 260 1/min  
Max. Current: 865,1 A  
Max. Voltage: 55,2 V  
Test voltage: 1,5 kV  
Winding pressing force: appr. 410 kN  
Mass total (1 pole): appr. 642 kg  
Mass moment of inertia: appr. 5109 kgm<sup>2</sup>  
Lifting only with 3D-Loading ring!  
Inspection acc. to P GEN QC2 3309DE!  
Manufacturing instruction: 5228245, 5228255,  
5228272, 5228287 !

## STANDARD PAINTING

Superfície/Surface  
Ra/acc.  
ISO 1302:1992  
Tolerâncias gerais  
General Tolerances  
ISO 2768 - mK

# ANDRITZ

## Hydro

Nº internoInternal Nº		=	
3 451543		+	
Desenho Nº/Drawing Nº		ÍndiceIndex	Fl./Sht. 1
BSJ-240-3451543		00	de la f. 1



# Referências

- [1] IEEE Std. 43-2000-5.2, Março 2000. ISBN 0-7381-1924-5 SH94806.
- [2] IEEE Std. 43-2000-5.3, Março 2000. ISBN 0-7381-1924-5 SH94806.
- [3] IEEE Std. 43-2000-5.4, Março 2000. ISBN 0-7381-1924-5 SH94806.
- [4] IEEE Std. 43-2000-6.3.3, Março 2000. ISBN 0-7381-1924-5 SH94806.
- [5] IEEE Std. 43-2000-12.2, Março 2000. ISBN 0-7381-1924-5 SH94806.
- [6] IEEE Std. 43-2000-12.3, Março 2000. ISBN 0-7381-1924-5 SH94806.
- [7] IEC Std. 60034-1-9.2 edição 12.0, Fevereiro 2010. ISBN 2-8318-1074-1.
- [8] Andritz Hydro GmbH. P GEN QC 2426/15DE, Outubro 2012. Hydro / Montage Polrad / Pole fertig montiert mit Polwicklungsstütze, Elektrische Prüfungen.
- [9] EDP. Aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor fornecimento dos equipamentos - processo de concurso, Fevereiro 2009. Condições Técnicas.